

ELEONOORA SALMINEN

Raideruuvivauriot lyhyissä vaihteissa



Eleonoora Salminen

Raideruuvivauriot lyhyissä vaihteissa

Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 32/2013

Liikennevirasto
Helsinki 2013

Kannen kuva: Eleonoora Salminen (Tampereen ratapihan vaihde Vo11)

Verkkojulkaisu pdf (www.liikennevirasto.fi)

ISSN-L 1798-6656

ISSN 1798-6664

ISBN 978-952-255-296-9

Liikennevirasto

PL 33

00521 HELSINKI

Puhelin 0295 34 3000

Eleonoora Salminen: Raideruuvivauriot lyhyissä vaihteissa. Liikennevirasto, infra- ja ympäristöosasto. Helsinki 2013. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 32/2013. 81 sivua ja 9 liitettä. ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6664, ISBN 978-952-255-296-9.

Avainsanat: raideruuvi, kiskonkiinnitykset, vaihteet

Tiivistelmä

Raideruuvit ovat rautatievaihteiden kiskonkiinnitykseen käytettäviä erikoiskantaruuveja. Ruuvien ennen aikainen vaurioituminen lyhyissä vaihteissa on osoittautunut toistuvaksi ongelmaksi Tampereen liikennepaikalla. Raideruuvien tehtävänä, yhdessä muitten kiskonkiinnitysten osien kanssa, on estää kiskon sivusiirtymät ja pitää raideleveys vakiona. Useiden vierekkäisten raideruuvien rikkoutuminen heikentää kiskonkiinnitysten kykyä vastustaa kiskon sivusuuntaista liikettä ja lisää kiskon sivusiirtymän ja samalla junan suistumisen riskiä. Junaturvallisuuden vaarantumisen lisäksi raideruuvien vaurioitumisesta aiheutuu ylimääräisiä kunnossapitokustannuksia sekä mahdollisia junaliikenteen viivästyksiä.

Tämän tutkimuksen tavoitteena oli selvittää miksi raideruuvit vaurioituvat ennen aikaisesti tietyissä lyhyissä vaihteissa Tampereen liikennepaikalla ja onko vaurioituminen kytköksissä jonkin tietyn kalustotyypin aiheuttamaan kuormitukseen. Raideruuvivaurioiden laajuutta kartoitettiin aluksi maastokäynneillä. Lisäksi katkenneiden raideruuvien murtopintoja tarkasteltiin laboratoriossa makrokameralla ja murtopinnoissa havaittiin selkeitä väsymismurtuman jälkiä. Eri valmistusvuosien raideruuveille tehtyjen vetokokeitten perusteella voidaan myös melko varmasti olettaa, että työssä tutkitut katkenneet raideruuvit olivat lujuusluokkaa 4.6 vaikka vaihteissa tulisi nykyisten määräysten mukaan käyttää lujuusluokan 5.6 raideruuveja.

Kokeellisessa kenttätutkimuksessa raideruuveihin kohdistuvaa kuormitusta mitattiin ruuvien sisään instrumentoitujen venymäliuskojen avulla ja kiskon siirtymiä mitattiin siirtymäantureilla. Venymämittaustuloksista voitiin havaita, että matkustajakalustosta aiheutuvat rasitukset eivät jakaudu tasaisesti kiskonkiinnityksen neljän raideruuvien kesken. Vastakiskosovituksen keskimmaisessa vastakiskopukissa yhden ruuvien venymä oli keskimäärin peräti viisinkertainen vertailumittauspaikasta saatuaan arvoon verrattuna.

Mittaustulokset eivät antaneet syytä epäillä, että ruuvien katkeaminen olisi kytköksissä johonkin tiettyyn kalustotyyppiin. Sen sijaan tulokset antoivat viitteitä siihen, että myötävaihteeseen ajaneiden junien vaihtuva-amplitudinen kuormitus olisi raideruuvien kannalta väsyttävämpää kuin vastavaihteeseen ajaneitten junien tasaisempi kuormitus.

Eleonoora Salminen: Skador på spårskruvar i korta växlar. Trafikverket, infrastruktur och miljö. Helsingfors 2013. Trafikverkets undersökningar och utredningar 32/2013. 81 sidor och 9 bilagor. ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6664, ISBN 978-952-255-296-9.

Sammanfattning

Spårskruvar är skruvar med speciellt huvud som används för rälsbefästning i järnvägsväxlar. Att skruvarna skadas i ett tidigt skede i korta växlar har visat sig vara ett återkommande problem på Tammerfors trafikplats. Spårskruvarna har i uppgift att tillsammans med de övriga delarna av rälsbefästningen förhindra att rälen förskjuts i sidläge och hålla spårvidden konstant. Om flera intelligande spårskruvar skadas försämras rälsbefästningens förmåga att förhindra att rälen rör sig och förskjuts i sidläge, vilket ökar risken för att tåget spårar ur. Utöver att tågsäkerheten äventyras medför skadade spårskruvar extra underhållskostnader och eventuellt också fördröjningar i tågtrafiken.

Målet med denna undersökning var att utreda varför spårskruvarna skadas i förtid i vissa korta växlar på Tammerfors trafikplats och om skadorna har något samband med belastningen av en viss typ av materiel. Till att börja med kartlades skadornas omfattning vid terrängbesök. Därtill undersöktes brottytorna på avbrutna spårskruvar i ett laboratorium med hjälp av en makrokamera. I brottytorna observerades tydliga spår av utmattningssprickor. Utifrån dragprov som gjorts på spårskruvar tillverkade olika år kan man med tämligen stor säkerhet anta att de avbrutna spårskruvarna var av hållfasthetsklass 4.6 även om spårskruvar av hållfasthetsklass 5.6 enligt dagens bestämmelser ska användas för växlar.

Vid en experimentell fältundersökning mättes belastningen på spårskruvarna med hjälp av töjningsgivare som hade installerats inuti skruvarna och förskjutningar av rälen mättes med hjälp av övergångsgivare. Resultaten av töjningsmätningarna visade att belastningen av passagerarmateriel inte fördelar sig jämt på de fyra spårskruvarna i rälsbefästningen. I det mellersta moträlsstödet i en korsning var töjningen hos en skruv i snitt hela femfaldig jämfört med det värde som man vid den jämförande mätningen.

Mätresultaten gav ingen anledning att misstänka att de avbrutna skruvarna skulle ha samband med en viss typ av materiel. Däremot indikerade resultaten att belastningen med variabel amplitud från tåg som körde i medväxel med hänsyn till spårskruvarna var mer slitande än en jämnare belastning från tåg som körde i motväxel.

Eleonoora Salminen: Screw spike failures in short railway turnouts. Finnish Transport Agency, Infrastructure and the Environment. Helsinki 2013. Research reports of the Finnish Transport Agency 32/2013. 81 pages and 9 appendices. ISSN-L 1798-6656, ISSN 1798-6664, ISBN 978-952-255-296-9.

Keywords: screw spike, rail fastenings, railway turnouts

Summary

Screw spikes with a special forged head are track fasteners used in railway turnouts. The premature damage of these screws has proven a reoccurring problem in short turnouts at Tampere railway yard. The purpose of the screw spikes, together with other fastening components, is to prevent lateral displacement of the rail and to maintain the track gauge. The breaking of several adjacent screw spikes weakens the rail fastening system's ability to resist lateral movement of the rail. This may result in critical lateral movement in the rail and eventually lead to train derailment. As well as posing a threat to railway safety, screw spike damage also causes additional maintenance cost and possible delays in railway traffic.

The aim of this study was to investigate why the screws spikes suffer premature damage in short turnouts at Tampere railway yard and whether the damage is connected to a loading caused by particular type of rolling stock. The extent of the screw spike damages were investigated at the rail yard. The fracture surfaces of broken screw spikes were examined with a macroscopic camera and the photos revealed clear surface features of fatigue fractures. Tensile tests conducted to screw spikes manufactured in different years, revealed that the investigated broken screw spikes were most likely made of 4.6 strength grade steel, although the minimum requirement for screw spike strength grade is currently 5.6.

The load environment of the screw spikes was measured with strain gauges instrumented in the screw spikes as a part of experimental field study. The lateral displacement of the turnout rail was also measured with displacement sensors. The strain measuring results showed that the load caused by commuter trains is not evenly distributed among the four screw spikes in the rail fastening. The strain in one of screw spikes in the middle of the diverging check rail was five times greater than the strain obtained from the comparative measuring point.

The results gave no evidence to suspect that the failure of the screw spikes is connected to a specific type of rolling stock. Instead, the results gave evidence that the trains traversing the turnout in trailing direction caused a more wearing variable-amplitude loading to the screw spikes than the trains traversing in facing direction.

Esipuhe

Tämän tutkimuksen on tehnyt Eleonoora Salminen diplomityönä Aalto-yliopiston insinööritieteiden korkeakoulun liikenne- ja tietekniikan tutkimusryhmässä. Työn tilaajana ja rahoittajana oli Liikennevirasto.

Työn valvojana toimi professori Terhi Pellinen ja ohjaajina Liikenneviraston puolesta dipl.ins. Tuomo Viitala sekä dipl.ins. Ville-Pekka Lilja. Kenttämittaukset ideoi ja järjesti yli-insinööri Veli-Antti Hakala.

Helsingissä elokuussa 2013

Liikennevirasto

Infra- ja ympäristöosasto

Sisällysluettelo

MERKINNÄT	9
MÄÄRITELMIÄ.....	11
1 JOHDANTO	12
1.1 Tutkimuksen tausta	12
1.2 Tutkimusongelma.....	12
1.3 Tutkimuksen tavoitteet, tutkimusmenetelmät ja tutkimuskohde	13
2 VAIHTEET	14
2.1 Vaihdetyytit ja merkinnät.....	14
2.2 Vaihteen rakenne ja osat.....	15
2.2.1 Kiskot	17
2.2.2 Vaihdepölkkyt	21
2.2.3 Kiskonkiinnitys	21
2.3 Vaihteiden suunnitteluperusteet.....	22
2.4 Vaihteiden tarkastus ja kunnossapito	24
3 KALUSTON JA VAIHTEEN VUOROVAIKUTUS.....	28
3.1 Kalustotyytit	28
3.2 Pyöräprofiili ja pyöräkerta	30
3.3 Pyörän ja kiskon vuorovaikutus	31
3.3.1 Pyöräkerran kulku raiteella	31
3.3.2 Kalustosta rataa kohdistuva kuormitus.....	34
3.3.3 Telien ohjautuminen vaihteessa	36
4 RAIDERUUVIT	38
4.1 Materiaaliominaisuudet ja lujuusvaatimukset.....	38
4.2 Tutkimuksia raideruuveista	42
5 KOKEELLINEN TUTKIMUS RAIDERUUVIIN KOHDISTUVISTA VOIMISTA	47
5.1 Laboratoriotutkimus	47
5.1.1 Tutkimuksen tavoite ja tutkimusmenetelmät	47
5.1.2 Ruuveista tehdyt havainnot	47
5.1.3 Venymäliusalla instrumentoitujen raideruuvien koekuormitus	50
5.2 Kenttätutkimus	54
5.2.1 Tutkimuksen tavoitteet, mittauspaikka ja alkuhavainnot	54
5.2.2 Tutkimusmenetelmät ja mittausmenettely	56
6 MITTAUSTULOKSET JA TULOSTEN TARKASTELU.....	63
6.1 Venymämittaus.....	63
6.3 Mittaustulosten luotettavuus.....	74
7 YHTEENVETO, PÄÄTELMÄT JA SUOSITUKSET	75
LÄHDELUETTELO	78
LIITTEET	
Liite 1	Raideruuvien tyyppipiirustus
Liite 2	Katkenneiden raideruuvien murtopintoja

Liite 3	Metlab Oy:n testausseleste raideruuvlin vetokokeesta
Liite 4	Rakennetekniikan koehallin testausseleste raideruuvlin vetokokeesta
Liite 5	Mittauslaitteiston kuvaus
Liite 6	Instrumentoitujen raideruuvlien voima-venymä-kuvaajat
Liite 7	Tampereen ratapihan raiteistokaavio
Liite 8	Koepäiväkirja
Liite 9	YV60-300-1:9-0 vaihteen linjakuvio

Merkinnät

A_5	Murtovenymä, metallin sitkeyttä kuvaava suure
α	Poikittaiskiihtyvyys kaarteessa, jossa ei ole kiskokallistusta [m/s ³]
α'	Nykäys, suure joka kuvaa junan matkustajamukavuutta [m/s ³]
d_0	Metallien vetokokeessa käytettävän koesauvan varren halkaisija ennen vetokoetta [m]
E	Kimmomoduuli eli elastisuuskerroin [Pa]
ε	Suhteellinen venymä eli kappaleen pituuden muutos suhteessa kappaleen alkuperäiseen pituuteen
G	Raideleveys [m]
k	Venymäliuskan liuskavakio
L	Junavaunun telikeskiöiden välinen etäisyys [m]
L_0	Metallien vetokokeessa käytetyn koesauvan mittapituus. [m]
L_u	Metallien vetokokeessa käytetyn koesauvan pituus murtumisen jälkeen. [m]
l	Sinikäyrän aallonpituus [m]
R	Radan kaarresäde [m]
R	Venymäliuskan resistanssi [Ω]
R_e	Myötölujuus [Pa]
R_{eH}	Ylempi myötöraja. Jännitys-venymä – kuvaajalla se jännitys, jossa metallin plastinen muodonmuutos alkaa [Pa]
R_{eL}	Alempi myötöraja, kertoo pienimmän jännityksen metallin myötöalueella [Pa]
R_m	Murtolujuus [Pa]
r_0	Junan pyörän kulkuympyrän säde [m]
S	Junan pyörien kulkuympyröiden välimatka [m]
S_0	Metallien vetokokeessa käytetyn koesauvan poikkileikkauksen pinta-ala. [m ²]
S_u	Metallien vetokokeessa käytetyn koesauvan murtumakohdan pinta-ala. [m ²]
V	Nopeus [km/h]
v	Nopeus [m/s]
$(\Sigma Y)_{2m}$	Liikkumaton 2 m pituiselle alueelle jakautunut poikittaiskuorma [kN]

$(Y)_{2m}$	Liikkuva 2 m pituiselle alueelle jakautunut keskimääräinen poikittaiskuorma
Y_{max}	Yksittäinen poikittaiskuorman huippuarvo
γ	Kartiokulma [°]
λ	Junan pyörien kartiokkuus
λ_g	Junan pyörien tehollinen kartiokkuus
Z	Murtokurouma [%]

Määritelmiä

Juna	Kalustoa, joka on määrätty junaksi ja jonka liikennöinnissä on noudatettava junaliikennettä koskevia määräyksiä.
Liikennepaikka	Liikennepaikka on liikenteenohjausta ja matkustajaja/tai tavaraliikennettä varten rajattu alue, jonka radanpitäjä on määritellyt liikennepaikaksi. Liikennepaikka voi koostua liikennepaikan osista
Lyhyt vaihde	Rautatievaihde, jonka rakenteesta johtuva suurin nopeus vaihteen poikkeavalla raiteella on enintään 40 km/h.
Pääraide	Pääraide on raide jolla noudatetaan Ratateknisten määräysten ja ohjeiden antamia vaatimuksia pääraiteesta. Ratapihalla pääraide on läpikulkuraide tai muuten tärkeä raide.
Raideruuvi	Vaihteiden kiskonkiinnityksissä käytetty erikoiskantaruuvi.
Tukikerros	Ratarakenteen päällimmäinen kerros.
Vaihtotyöyksikkö	Kalustoa joka ei täytä junan määritelmää, esimerkiksi ratapihalla vaihtotyössä olevat veturit ja niiden siirtämät vaunut.

1 Johdanto

1.1 Tutkimuksen tausta

Rautatievaihteet ovat kiskoliikenteen risteyskohtia, jotka mahdollistavat kiskoliikenteen siirtymisen raiteiden välillä ja joita ilman rautateiden liikennöinti ei olisi mahdollista. Suomen valtion rataverkolla oli vuonna 2011 yhteensä 5547 käytössä olevaa vaihdetta (Liikennevirasto 2012b). Vaihteet ovat kunnossapidon näkökulmasta radan päällysrakenteen vaativin osa, sillä vaihteiden monimutkainen rakenne ja liikkuvat osat tekevät niistä erityisen alttiita vaurioille ja kulumille (Nummelin 2002). Lisäksi Suomen vuodenaikojen mukaan vaihtelevat sääolosuhteet asettavat kovia vaatimuksia vaihteiden osille ja materiaaleille, sillä niiden on kestävä jopa 70 °C asteen lämpötilan vaihteluita (Hölttä 2011). Vaihteet vaativatkin säännöllisiä tarkastuksia ja huoltotoimenpiteitä koko elinkaarensa ajan, jotta niiden turvallinen liikennöinti on mahdollista.

Suomessa rataverkon kunnossapitoon käytetään vuosittain noin 145 miljoonaa euroa (Rakennuslehti 2012). Vaihteiden kunnossapito kuluttaa tästä summasta suurimman yksittäisen osan. Taloudellisten menetysten lisäksi vaihteissa esiintyvät viat ja vauriot aiheuttavat myös valtaosan ratainfrastruktuurista johtuvista junaliikenteen häiriöistä. (Nummelin 2002.) Kasvavat paineet raideliikenteen täsmällisyyden parantamisesta ovat siten viime vuosina luoneet yhä suurempia odotuksia rataverkon osien kunnossapidolle (Salkonen 2008).

Rataverkon peruskunnossapito on avattu Suomessa vaiheittain kilpailulle vuodesta 2004 alkaen. Liikennevirasto vastaa radanpitäjänä kunnossapitourakoiden kilpailuttamisesta. Radan ja turvalaitteiden peruskunnossapitoa varten rataverkko on jaettu kahteentoista erikseen kilpailutettavaan kunnossapitoalueeseen, joista yksitoista on vuoden 2012 loppuun mennessä kilpailutettu ainakin kerran. (Liikennevirasto 2012a.) Kunnossapitoalueiden lisäksi rataverkko on jaettu neljään suurempaan isännöintialueeseen, joille jokaiselle on nimetty vastuullinen rataisännöitsijä sekä alueelliset rataisännöitsijät. Kunnossapidon kilpailuttamisen myötä kunnossapitotoimien ennakointi on noussut entistä tärkeämpään asemaan (Ahtiainen 2012).

Kunnossapitourakan voittanut yritys vastaa kunnossapitoalueellansa sijaitsevien vaihteiden yleiskunnossapidosta. Vaihteiden yleiskunnossapito on ympärivuotinen prosessi, joka koostuu erilaisista vaihteen tarkastuksista ja mittauksista, havaittujen vikojen korjaustoimenpiteistä sekä talvikunnossapidosta. Vaihteen tarkastuksessa mitattavien ja tarkastettavien kohteiden määrä on huomattavan suuri ja turvallisuuden kannalta vähemmän kriittisten kohtien tarkastus voi kiireessä jäädä helposti vähemmälle huomiolle.

1.2 Tutkimusongelma

Raideruuvien tehtävänä, yhdessä muiden kiskonkiinnitysten osien kanssa, on estää kiskon sivusiirtymät ja pitää raideleveys vakiona. Vaihteissa raideleveyden säilyminen on ensiarvoisen tärkeää, sillä jo pienetkin muutokset raideleveydessä lisäävät junan suistumisriskiä. Useampien vierekkäisten raideruuvien katkeaminen heikentää kiskonkiinnityksen kykyä vastustaa kiskon siirtymiä ja pahimmassa tapauksessa kisko

voi päästä liikkumaan junakuorman alla niin paljon, että seurauksena on junan suistuminen.

Rautatievaihteiden kiskonkiinnityksissä käytettävien raideruuvien katkeaminen on osoittautunut toistuvaksi ongelmaksi Tampereen liikennepaikalla 8–10 viime vuoden aikana. Ruuveja on katkennut määrättyissä lyhyissä vaihteissa vuosittain huomattavia määriä, vaikka ruuvien tulisi kestää vaurioitumatta vaihteen 40 vuoden käyttöiän. Vaihteiden tarkastuksessa Tampereella keväällä 2012 havaittiin yli 100 yksittäistä katkennutta tai murtunutta ruuvia. Eräässä vaihteessa katkenneita ruuveja oli jopa niin runsaasti, että vaihteeseen ajanut Pendolino-juna oli lähellä suistua raiteilta (VR Track Oy, 2012). Vastaava ongelma on havaittu eri tyypisissä vaihteissa myös Vainikkalan, Riihimäen, Kouvolan sekä Imatran liikennepaikoilla.

1.3 Tutkimuksen tavoitteet, tutkimusmenetelmät ja tutkimuskohde

Tämän työn tavoitteena oli kartoittaa raideruuvien vaurioitumisilmiön laajuutta ja taustoja tarkemmin sekä selvittää syy sille, miksi raideruuvit vaurioituvat ennenaikaisesti tietyissä lyhyissä vaihteissa Tampereen liikennepaikalla. Tavoitteena oli lisäksi määrittää keinoja ongelman ehkäisemiseksi tulevaisuudessa ja antaa ohjeistusta mahdollisille jatkotutkimuksille ja –toimenpiteille.

Työssä perehdyttiin aluksi kirjallisuustutkimuksen avulla vaihteiden rakenteeseen ja toimintaan sekä kaluston ja vaihteen vuorovaikutukseen. Kirjallisuustutkimuksella pyrittiin erityisesti selvittämään mitkä vaihteen ja kaluston ominaisuudet vaikuttavat eniten kiskonkiinnityksiin kohdistuviin voimiin. Lisäksi kirjallisuustutkimuksessa perehdyttiin lyhyesti raideruuvien materiaaliominaisuuksiin sekä käytiin läpi työhön olennaisesti liittyvää aiempaa tutkimusta.

Kenttä- ja laboratoriotutkimusten avulla tutkittiin raideruuveihin kohdistuvia kuormia ja pyrittiin selvittämään katkeamiseen johtavia syitä. Laboratoriotutkimuksissa tutkittiin katkenneiden ruuvien murtopintojen ominaisuuksia sekä testattiin kenttämittauksissa käytettyjen venymäliuskojen toimivuutta ruuvissa. Kenttätutkimuksessa raideruuveihin kohdistuvaa kalustosta johtuvaa kuormitusta havainnoitiin yksittäisiin ruuveihin kohdistuvilla venymämittauksilla sekä vastakiskon ja yhden ruuvin yläpään siirtymämittauksilla. Venymä- ja siirtymämittauksilla pyrittiin selvittämään erityisesti, millä tavoin eri kalustotyyppien aiheuttamat kuormitukset vaihteessa eroavat toisistaan ja onko ruuvien katkeaminen yhteydessä jonkin tietyn kalustotyyppin aiheuttamaan kuormitukseen. Kenttätutkimuksessa käytettiin apuna myös suurnopeuskuvausta mahdollisten näkyvien kuormitusten ja kuormituserojen havaitsemiseen.

Työn toteuttamiseen käytettävän ajan rajallisuuden vuoksi kaikkia Tampereen ratapihalla sijaitsevia ongelmavaihteita ei voitu tutkia tarkemmin. Kenttätutkimuksia varten valittiin yksi vaihte lähempään tarkasteluun. Vaihteen valintaan vaikuttivat erityisesti vaihteen sijainti ratapihan reunalla ja saavutettavuus ajoneuvolla sekä havaittujen vaurioiden määrä. Tutkimusmenetelmiä ja koejärjestelyitä kuvataan tarkemmin luvussa 5.

2 Vaihteet

2.1 Vaihdeyypit ja merkinnät

Rautatievaihteet voidaan jakaa neljään eri perustyyppiin, joita ovat yksinkertaiset vaihteet, kaksoisvaihteet, risteysvaihteet ja raideristeykset (Nummelin, M. 2003). Suorassa yksinkertaisessa vaihteessa yhdeltä suoralta raiteelta haarautuu yksi poikkeava raide. Suorien yksinkertaisten vaihteiden lisäksi yksinkertaisiin vaihteisiin luetetaan myös kaarrevaihteet ja tasapuoliset vaihteet. Kaarrevaihteessa poikkeava raide haarautuu kaarevasta raiteesta, joko sisä- tai ulkokaaren suuntaan. Suora yksinkertainen vaihte on yleisin Suomessa käytössä oleva vaihdeyppi. (Ratahallintokeskus 2000.)

Tyyppijaon lisäksi vaihteita luokitellaan myös vaihteessa sallitun nopeuden mukaan lyhyisiin ja pitkiin vaihteisiin. Lyhyissä vaihteissa suurin sallittu nopeus poikkeavalla raiteella on aina enintään 35 km/h ja poikkeavan raiteen kaarresäde on enintään 300 metriä. Pitkissä vaihteissa, eli vaihteissa joiden kaarresäde on yli 300 m ja risteyskulma loivempi kuin 1:9, voidaan poikkeavalla raiteella ajaa vaihdeyypistä riippuen jopa 160 km/h nopeudella. Vaihteen poikkeavan raiteen suurin teoreettinen nopeus voidaan laskea seuraavasta kaavasta:

$$V = 2,9 \sqrt{R}, \quad \text{missä } V \text{ on nopeus [km/h] ja } R \text{ on kaarresäde metreissä.} \quad (1)$$

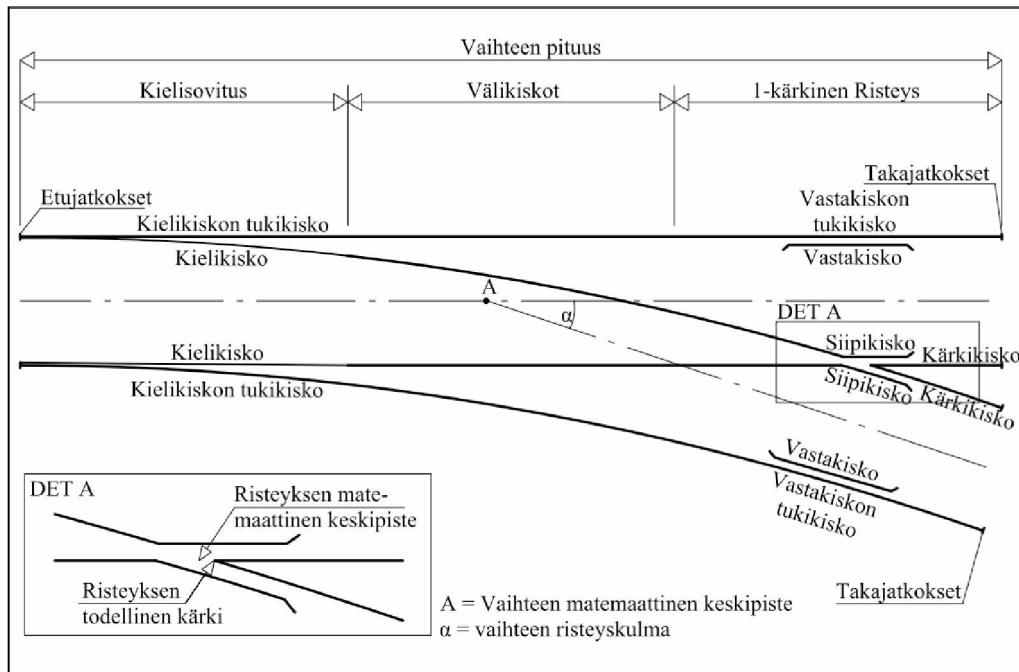
Silloin esimerkiksi 300 metrin kaarresäteen lyhyessä vaihteessa voitaisiin poikkeavalla raiteella ajaa teoriassa 50 km/h. Suomessa lyhyet vaihteet on mitoitettu kuitenkin 40 km/h nopeudelle. (Ratahallintokeskus 2000.) Vaihteiden mitoitukseen on perehdytty tarkemmin luvussa 2.3.

Kuvassa 1 on havainnollistettu, kuinka yksinkertaista suoraa vaihdetta voidaan liikennöidä joko myötä- tai vastavaihteeseen. Ajo myötävaihteeseen tapahtuu poikkeavalta raiteelta suoralle raiteelle ja ajo vastavaihteeseen suoralta raiteelta poikkeavalle raiteelle. (Ratahallintokeskus 2000.) Vaihdetta kutsutaan oikeakätiseksi, kun sen poikkeava raide haarautuu vastavaihteeseen ajettaessa oikealle ja vastaavasti vasenkätiseksi, kun poikkeava raide haarautuu vasemmalle (Nummelin 1994).

Ratatekniset ohjeet asettavat (Ratahallintokeskus 2000) vaihteen rakenteelle seuraavat perusvaatimukset:

- Junan tulee kulkea vaihteessa kulkusuunnasta, nopeudesta ja akselipainosta riippumatta pehmeästi ja sysäyksettömästi.
- Kielien asennon tulee olla tukeva ja kielen on liityttävä tiukasti tukikiskoon myös junan kuormituksen alaisena.
- Pieni vaihteen virhe ei saa suistaa junaa radalta.
- Vaihteen on oltava käännettävissä tarpeellisella varmuudella ja riittävän kevyesti kaikissa oloissa.
- Vaihteen osien tulee olla kestäviä ja pienin kustannuksin kunnossapidettävissä.
- Vaihteeseen tulee voida asentaa tarpeelliset varusteet ottaen huomioon myös talvikunnossapito.

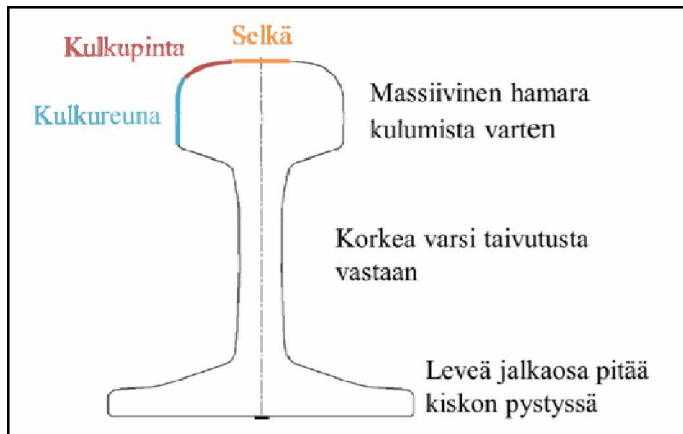
Yksinkertainen vaihde voidaan jakaa pituussuunnassa kolmeen pääosaan: kielisovitus, välikiskot ja risteys. Nämä vaihteen osat on esitetty tarkemmin kuvassa 3. Kielisovitus koostuu kahdesta kääntyvästä kielikiskosta sekä näitten tukikiskoista. Vaihteen kieliiä liikutetaan nykyisin pääosin kauko-ohjatusti joko sähkömekaanisella tai -hydraulisella vaihteen kääntölaitteella. Vaihteen risteuksen molemmiin puoliin sijaitsevat vastakiskot sekä niiden tukikiskot muodostavat oikean- ja vasemmanpuoleisen vastakiskosovituksen. Vaihteen risteys voi olla joko yhtenäinen mangaaniteräksestä valmistettu kappale, tai se voi koostua erillisistä ruuviliitoksella yhteenliitettävistä kärki- ja siipikiskoista. Vaihteen risteuksen matemaattinen risteyspiste on se piste, jossa risteuksen kulkureunat leikkaavat. Vaihteen risteyskulma ilmaistaan yleensä tangenttina, esimerkiksi 1:9. Vaihteen pituus on sen etu- ja takajatkoksien väliin jäävä etäisyys, joka YV60–300–1:9 vaihteella on 34,43 m. (Ratahallintokeskus 2000.)



Kuva 3 Vaihteen osat.

2.2.1 Kiskot

Kiskoja luokitellaan kiskoprofiilin perusteella. Suomessa ja muualla maailmassa on nykyään käytössä leveäjalkainen Vignole-kiskoprofiili. Kuvassa 4 on esitetty leveäjalkaisen kiskoprofiilin poikkileikkaus, profiilin osien nimitykset sekä niiden tehtävät.

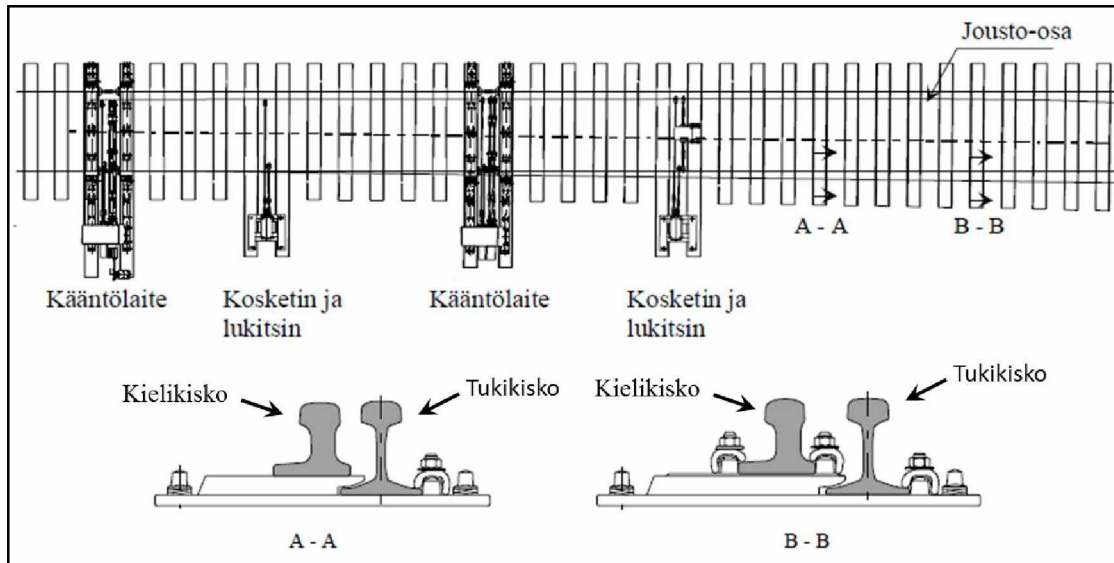


Kuva 4 Leveäjalkainen kiskoprofiili ja kiskon osat (Lainattu muokattuna lähteistä Melamies, 2011 & Viitala 2011).

Eurooppalaisen standardisointijärjestön CEN:n mukaisia kiskoprofiileja merkitään kiskon metrimassan ilmoittavalla kokonaisluvulla, kirjaimella E sekä käytettävän standardin versioluvulla; esimerkiksi 60E1. Muita Suomessa käytössä olevia kiskoprofiileja merkitään kirjaimella K sekä kiskon massan metriä kohden ilmoittavalla luvulla, esimerkiksi K43. Tuki-, kieli- ja vastakiskoilla on vaihteissa omat kiskoprofiilinsa, jotka on esitelty tarkemmin seuraavilla sivuilla.

Kielisovitus

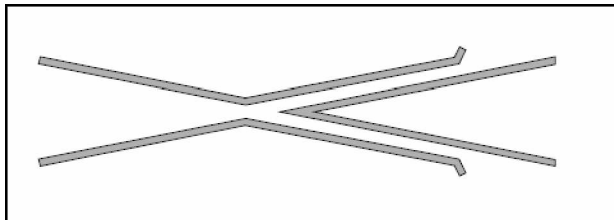
Vaihteen kielisovitus koostuu kuvan 5 mukaisesti kahdesta kääntölaitteella käännettävästä kielikiskosta sekä kielikiskojen tukikiskoista. Kaikissa 60E1-kiskoprofiilin vaihteissa käytetään joustokantaista kielirakennetta. Joustokantaiset kielet ovat kokonaisuudessaan samaa kielikiskoa eikä niissä ole kieleen hitsattavaa jatkekiskoa. Kielen joustavuus taataan kaventamalla kiskon jalkaa jousto-osuuden matkalta, jolloin kielen kääntämiseen tarvittava voima pienenee. Kielen kantaosa on taottu normaalikiskon muotoon, jotta se voidaan liittää välidiksoon joko hitsaamalla tai sidekisko-kojatkoksella. (Ratahallintokeskus2000.)



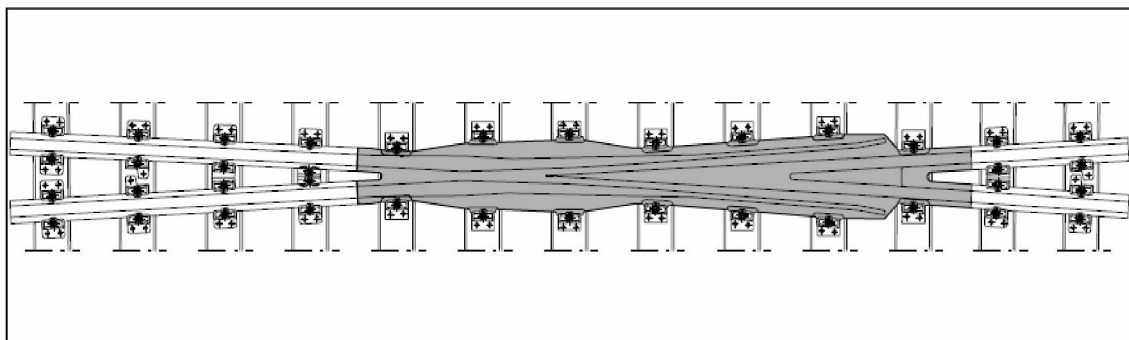
Kuva 5 Kielisovitus oikeakätisessä YV60-900-1:18 vaihteessa (Lainattu muokattuna lähteestä Ratahallintokeskus 2000).

Vaihteen risteys

Lyhyissä vaihteissa käytetään kuvan 6 mukaisia kiinteitä 1-kärkisiä risteysksiä. 60E1-kiskoprofiilin vaihteiden risteyksissä käytetään kuvan 7 mukaisia mangaaniteräksestä valmistettuja risteysksiä. Mangaaniteräs kovettuu liikenteen kuormituksen alla ja soveltuu siten erityisesti raskaasti kuormitettuihin ja vilkkaasti liikennöityihin vaihteisiin. (Ratahallintokeskus 2000.)



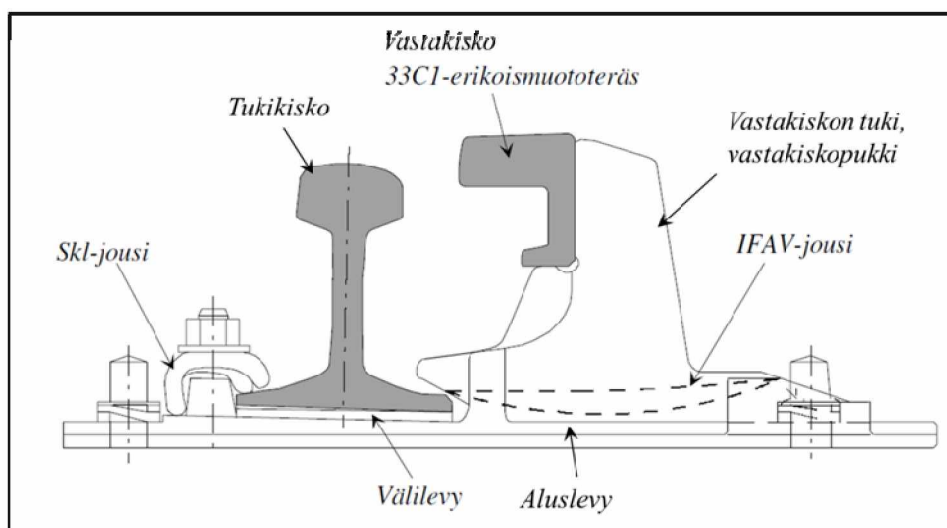
Kuva 6 1-kärkisen risteysen periaatekuva (Ratahallintokeskus 2000).



Kuva 7 YV60-300-1:9 vaihteen mangaaniteräksinen 1-kärkinen risteys (Ratahallintokeskus 2000).

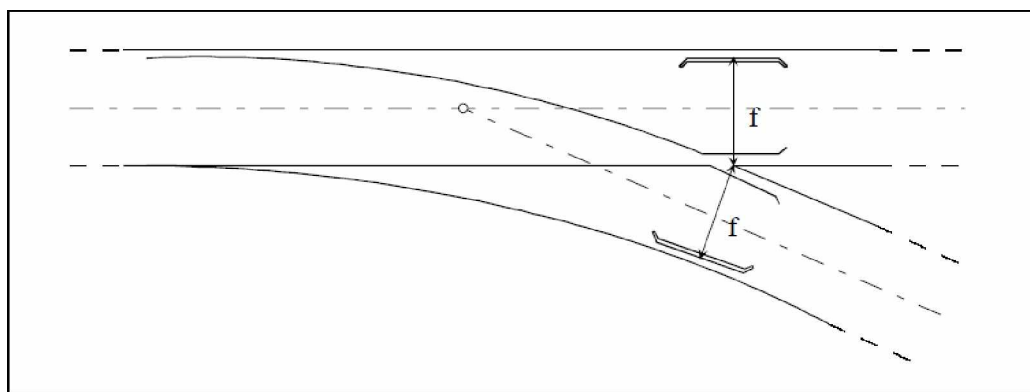
Vastakiskosovitus

Vastakiskot ovat risteysen molemmin puolin, varsinaisen tukikiskon sisäpuolella, sijaitsevat lyhyet 33C1-vastakiskoprofiilin mukaiset kiskot, joiden tehtävänä on ohjata kaluston pyöräkerta risteysen kärjen ja siipikiskojen välisen ohjauksettoman osuuden ohi. Vastakiskot varmistavat näin junan turvallisen kulun vaihteen yli. Vastakiskon tuki, eli vastakiskopukki, voidaan hitsata tukikiskon aluslevyyn tai vaihtoehtoisesti vastakiskopukki ja aluslevy voidaan valaa yhtenäisenä kappaleena. Kuvassa 8 on esitetty vastakiskosovituksen poikkileikkaus. (Ratahallintokeskus 2000.)



Kuva 8 Vastakiskosovituksen poikkileikkaus (Ratahallintokeskus 2000).

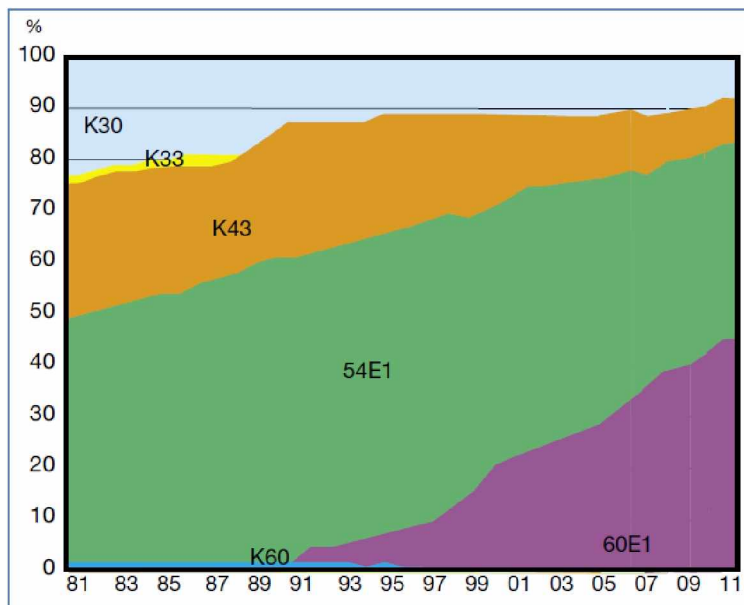
Vaihteen toiminnan kannalta kriittisimmät kohdat vastakiskosovituksessa ovat vastakiskon kulkureunan ja risteysen kulkureunan välinen etäisyys sekä vastakiskojen sisäänajokulma. Kuvassa 9 on havainnollistettu vastakiskon kulkureunan ja vaihteen risteysen välistä etäisyyttä f , joka on pidettävä tarkasti toleranssien sisällä, jotta vaihde on turvallisesti liikennöitävissä ja risteysen turha kulumisen vältetään. (Ratahallintokeskus 2000.)



Kuva 9 Vastakiskon kulkureunan ja risteysen kärjen välinen etäisyys (Ratahallintokeskus 2000).

Kuvassa 10 on esitetty Suomen päärataverkon kiskoprofiilin jakauma vuosina 1981–2011. Kuvasta voidaan havaita, että 60E1 kiskoprofiilin raiteiden osuus on kasvanut tasaisesti 1990-luvun alusta lähtien ja samaan aikaan pienempien kiskoprofiilien osuus on pienentynyt. Kiskon suurempi metripaino tarkoittaa suurempaa kiskon poikkipinta-alaa, josta seuraavat kiskon suurempi taivutusvastus ja jäyhyysmomentti. Suuremman kiskoprofiilin käyttö mahdollistaa suurempien akselipainokohtaisten nopeuksien sallimisen rataverkolla. (Ratahallintokeskus 2002a.)

Suomen rataverkosta on 77 % jatkuvakiskoraiteista ja loppuosa lyhyt- tai pitkäkiskoraiteista (Liikennevirasto, 2012). Jatkuvakiskoraiteella tarkoitetaan raidetta, jonka kiskopituus on yli 300 metriä. Toisin kuin lyhyt- ja pitkäkiskoraiteilla, joissa kiskot liitetään toisiinsa sidejatkoksilla, jatkuvakiskoraiteessa kiskot liitetään yhteen aina hitsaamalla. Teräksen lämpölaajenemisen aiheuttamat kiskonpituuden muutokset on jatkuvakiskoraiteessa estetty kiskon päitä ja vaihteessa vaihteen kielä lukun otta-
matta. Kiskonkiinnitysten riittävällä läpivetoastuksella ja sopivalla tukikerrosrakenteella tukikerroksen massa ja lujuus saadaan vastustamaan lämpövoimia. Jatkuvakiskoraide mahdollistaa suuret yli 120 km/h nopeudet. Jatkuvakiskovaihteiden kisko-
jatkokset ovat hitsattuja ja vaihde yhdistetään hitsaamalla jatkuvakiskoraiteeseen. (Ratahallintokeskus, 1998.)



Kuva 10 Kiskoprofiilin kehitys Suomen rataverkolla 1981–2011 (Liikennevirasto 2012b).

Suomen rataverkolla käytössä olevista vaihteista 77,6 % on kiskoprofiililtaan joko 54E1 tai 60E1. Suuremman 60E1-kiskoprofiilin vaihteiden lukumäärä ohitti K43-kiskoprofiilin vaihteiden lukumäärän vuoden 2008 aikana (Pollari 2011). Kiskot valmistetaan yleensä R260 kiskoteräslaadun teräksestä, jonka vetomurtolujuus on 800 N/mm². Vaihteiden kestävyysparantamiseksi raskaasti kuormitetuissa vaihteissa voidaan myös käyttää R350HT kiskoteräslaadua, jonka vetomurtolujuus 900 N/mm². (Nummelin 2003.) Vuodesta 1994 kaikki 60E1-vaihteet on rakennettu 1:40 kiskonkallistuksella koko vaihteen matkalta. (Ratahallintokeskus 2000.)

2.2.2 Vaihdepölkkyt

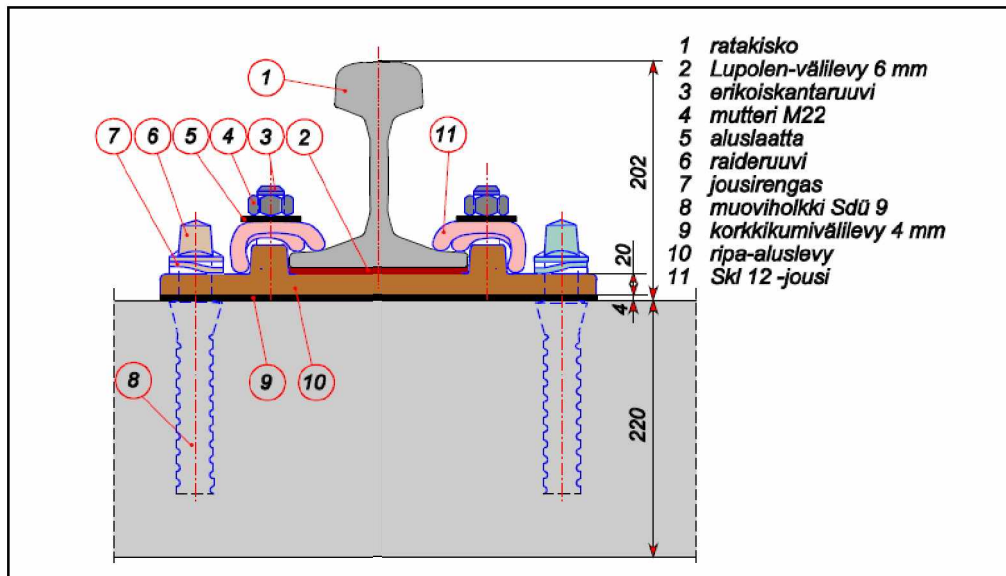
Ensimmäinen betonipölkkyinen vaihde otettiin Suomessa käyttöön vuonna 1990 (Nummelin, 1994). Vuodesta 1993 lähtien kaikki 60E1-, 54E1- ja K43-kiskoprofiilin vaihteet on rakennettu betonipölkkyisinä. Betonipölkkyt ovat puupölkkyihin verrattuna jäykempiä ja varmistavat vaihteen geometrian pysyvyyden paremmin. (Nummelin 2003.) Betonipölkkyraiteella on 50–80 % suurempi sivuttaisvastus kuin puupölkkyraiteella ja lisäksi betonipölkkyt on muotoiltu niin, että ne vastustavat mahdollisimman tehokkaasti liikettä tukikerroksessa (Ratahallintokeskus 2002). Betonivaihdepölkkyt ovat kaikki erimittaisia. Kunkin vaihdepölkyn yksilöllinen mitta ja tunnus määritetään vaihteen linjakuviossa. Yhteensä erilaisia pölkkytyyppejä on noin 1000. (Pollari, 2011.) 60E1-kiskoprofiilin vaihteissa vaihdepölkkyt on asetettu kulmanpuolittajan mukaiseen asentoon, eli jokainen pölkky on hiukan eri kulmassa suoraan raiteeseen nähden (Nummelin 2003).

Suomessa vaihdepölkkyt valmistaa Parma Oy A-betong Ab:n lisenssillä Forssassa (Pollari, 2011). Valmistuksen aikana vaihdepölkkyjen sisälle valetaan 20 jänneterästä koko pölkyn pituudelle. Raideruuvien holkit valetaan myös pölkkyihin valmiiksi. Nykyaikaisilla teollisilla valmistusmenetelmillä raideruuviholkit saadaan asennettua ± 1 mm tarkkuudella oikeisiin kohtiin. Suomessa valmistettu betonivaihdepölkky painaa keskimäärin 400 kg/m. (Nummelin, 2003.)

2.2.3 Kiskonkiinnitys

Kiskonkiinnityksen tehtävänä on estää kiskon kaatuminen sekä sivusiirtymät ratapölkkyllä junakuorman alla siten, että raideleveys pysyy vakiona. (Andersson et al. 2007). Kiinnityksen tulee kuitenkin sallia pienet pystysuuntaiset liikkeet. Lisäksi kiskonkiinnityksen tulee pitää kisko pituussuunnassa paikoillaan mahdollisimman tehokkaasti. Pienintä voimaa, jolla kisko saadaan liikkumaan kiinnityksen alla, kutsutaan läpiveto-
vastukseksi. Suomessa kaikissa uusissa betonipölkkyvaihteissa käytetään kiskonkiinnitykseen saksalaisen Vosslohin Skl 12 -jousikiinnitystä (Ratahallintokeskus 2002a). Skl 12 -jousikiinnityksen kokoonpano ja osat on esitetty kuvassa 11.

Skl 12-jousikiinnitys esiasennetaan pölkkyyn jo tehtaalla ja kiinnityksen lopullinen asennus ja kiristys tehdään vaihdehallilla vaihdetta koottaessa. Skl 12-jousikiinnityksessä kisko painetaan jousirenkaalla ja mutterilla kiinni metalliseen ripa-aluslevyyn. Jousirenkaan taipuva keskiosa ottaa vastaan kiskon jalan pystysuuntaiset liikkeet kiskon pyrkien kalliutumaan junakuorman alla. (Vossloh 2012.) Ripa-aluslevyn ja kiskon välissä on 6 mm paksuinen kuminen Lupolen-välilevy, joka antaa kiinnitykselle joustavuutta ja lisää kiskon ja aluslevyn välistä kitkaa, jolloin kiskoon syntyvät pituussuuntaiset voimat välittyvät paremmin pölkkyyn ja siitä edelleen radan rakennekerrokseen. Aluslevyn ja pölkyn välissä on 4 mm paksuinen korkkikumivälilevy, joka antaa kiskonkiinnitykselle joustavuutta (Teknikum 2012). Kuvassa 12 on esitetty va-
semmallalla esiasennettu sekä oikealla valmiiksi asennettu Skl 12-jousikiinnitys.



Kuva 11 Skl 12-jousikiinnityksen poikkileikkaus (Ratahallintokeskus 2002a).

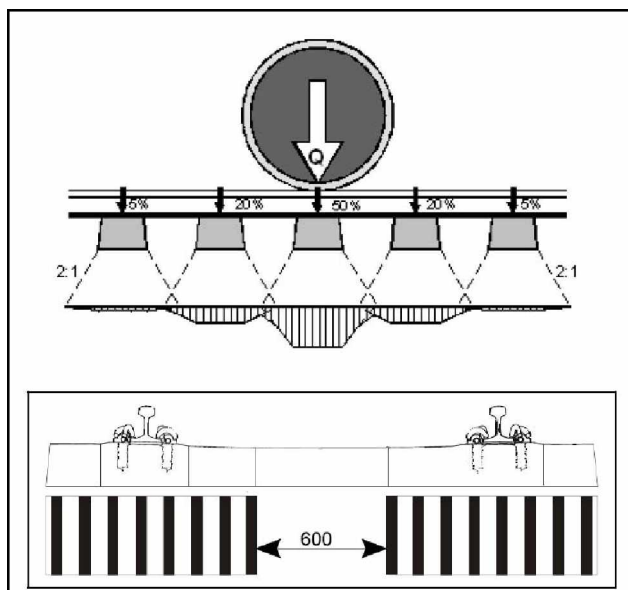


Kuva 12 Skl 12 -jousikiinnitys, vasemmalla esiasennettuna ja oikealla valmiiksi asennettuna (Vossloh 2012).

Ripa-aluslevy kiinnitetään ratapölkkyyn R170-P-tyyppin raideruuveilla. (Ratahallintokeskus 2002a). Raideruuvit ovat kiskonkiinnityksissä käytettäviä erikoisruuveja, joita Suomessa valmistaa Inhan Tehtaat Oy. Ruuvien kiristysmomentin vaihteessa tulee olla 250 Nm (Ratahallintokeskus 2006). Raideruuvien ominaisuuksia on käsitelty tarkemmin luvussa 4.

2.3 Vaihteiden suunnitteluperusteet

Vaihteet mitoitetaan staattisille akselipainoille nopeuden mukaan. Akselipainolla tarkoitetaan akselin pyörien kautta rataan välittyvää yhteenlaskettua kuormitusta. Lyhyissä 60E1-kiskoprofilin vaihteissa suora raide mitoitetaan nopeudelle 220 km/h, jolloin mitoittava staattinen akselipaino on 220 kN. Poikkeavalla vaihteella mitoittava nopeus on 40 km/h ja sitä vastaava mitoittava akselipaino 300 kN. (Ratahallintokeskus 2006.) Pystysuoran junakuorman oletetaan jakautuvan ratapölkyltä tukikerrokseen kuvan 13 mukaisesti.



Kuva 13 Pystysuoran junakuorman jakautuminen (Ratahallintokeskus 2008).

Vaihteessa sallituille poikittaisuuntaisille voimille ei ole asetettu ylärajaa kansainvälisissä standardeissa. Suomessa lyhyiden vaihteiden vaakavoimille on kuitenkin asetettu omat kokemuseräiset ylärajat, jotka on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1 Poikittaiskuormien maksimiavot lyhyissä vaihteissa (Ratahallintokeskus 2000.)

$(\Sigma Y)_{2m}$	70 kN	liikkumaton 2 m pituiselle alueelle jakautunut poikittaiskuorma
$(Y)_{2m}$	75 kN	liikkuva 2 m pituiselle alueelle jakautunut keskimääräinen poikittaiskuorma
Y_{max}	95 kN	yksittäinen poikittaiskuorman huippuarvo

Lyhyissä vaihteissa geometrian suunnittelun lähtökohtina ovat poikkeavalla raiteella sallittava tavoitenopeus sekä suurin sallittu poikittaiskiihtyvyys. Kun juna kulkee kaarteessa, siihen kohdistuu keskihakuvoima ja sitä vastustava voima, joka aiheuttaa matkustajiin ulkokaarten suuntaan kohdistuvaa kiihtyvyyttä. Tämän poikittaiskiihtyvyyden maksimiavot vaihteissa saa Suomessa olla enintään $0,65 \text{ m/s}^2$. Keskeiskiihtyvyys a [m/s^2] kaarteissa vaihteille, joissa ei ole kallistusta, voidaan laskea kaavalla

$$a = \frac{V^2}{12,96 * R}, \quad (2)$$

missä V on nopeus [km/h] ja R on kaarresäde [m]. Kun poikittaiskiihtyvyyden maksimiavot tiedetään, minimikaarresäde tietyllä nopeudella saadaan kaavasta

$$R = \frac{V^2}{0,424} \quad (3)$$

Junan siirtyessä suoralta raiteelta kaarelle sen poikittaiskiihtyvyys kasvaa nolasta kaarteeseen arvoon. Tästä kiihtyvyyden muutoksesta käytetään rautatietekniikassa termiä nykäys. Nykäys kuvaa matkustajamukavuutta, eli sitä kuinka paljon juomat läikkyvät ravintolavaunussa. Nykäyksen yksikkö on kiihtyvyyden muutos aikayksikköä kohden, m/s^3 . Vaihteissa suurin sallittu nykäyksen arvo on $1,1 \text{ m/s}^3$. Nykäys lasketaan seuraavasti:

$$a' = \frac{a}{t} = a \frac{v}{L}, \text{ missä} \quad (4)$$

a' on nykäys [m/s^3]

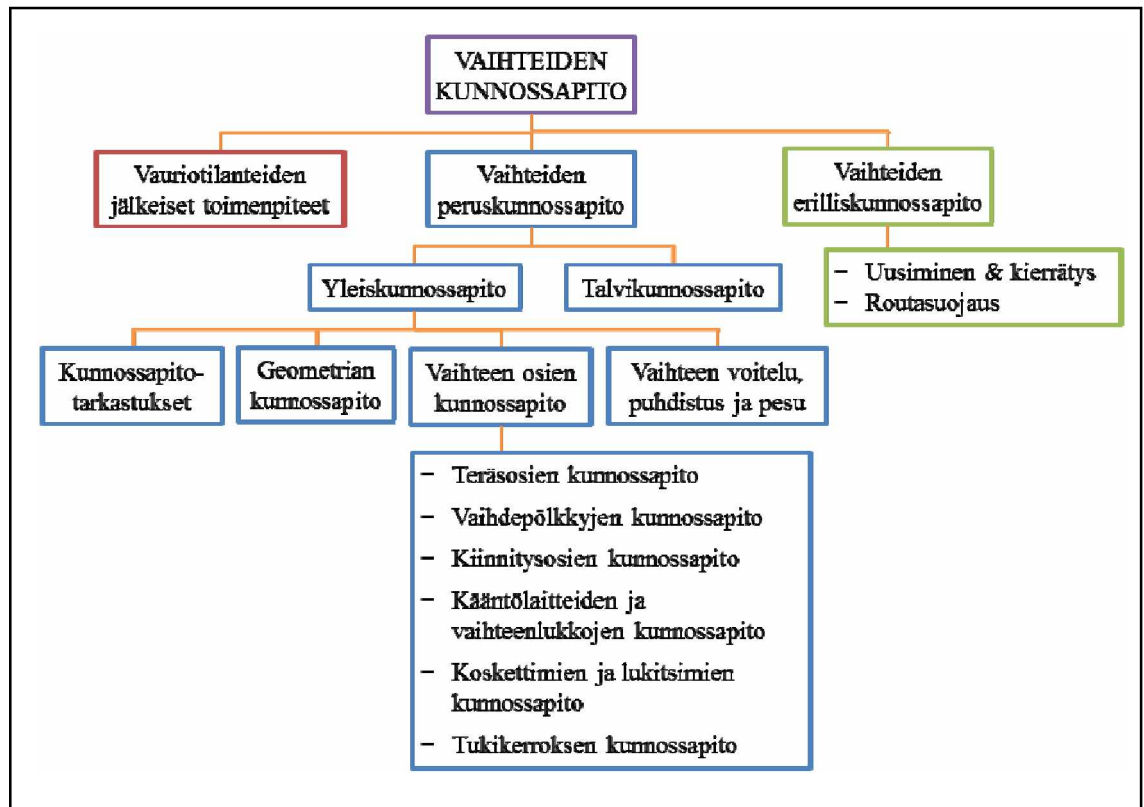
L vaunun telikeskiöiden välinen etäisyys [m]

v junan nopeus [m/s]. (Ratahallintokeskus 2000.)

2.4 Vaihteiden tarkastus ja kunnossapito

Vaihteiden kunnossapito aiheuttaa merkittävän osan koko Suomen rautateiden kunnossapitokustannuksista. Ruotsissa on laskettu, että vaihteiden vikojen korjauksen osuus on puolet kaikista radan huoltotoimenpiteistä, ja että 21 % kaikista junaliikenteen häiriöistä on seurausta vaihteiden vioista (Johansson et al. 2010). Jotta vaihteet pysyisivät ympäri vuoden junaturvallisuuden edellyttämässä kunnossa, ne vaativat säännöllisiä tarkastuksia ja kunnossapitotoimenpiteitä. Kunnossapidon toteutuksen ajoitus on suunniteltava huolellisesti, sillä oikea-aikaisella kunnossapidolla voidaan pidentää vaihteen käyttöikää ja samalla vähentää kunnossapidosta aiheutuvia kustannuksia. (Ratahallintokeskus 2000.)

Vaihteiden kunnossapito voidaan jakaa peruskunnossapitoon, erilliskunnossapitoon sekä vauriotilanteiden jälkeisiin toimenpiteisiin. Vaihteiden peruskunnossapitoon sisältyy vaihteiden yleiskunnossapito sekä vaihteiden talvikunnossapito. Yleiskunnossapitoa ovat vaihteiden kunnossapitotarkastukset, geometrian kunnossapito, vaihteiden osien kunnossapito sekä vaihteiden voitelu ja puhdistus. Vaihteiden talvikunnossapitoon sisältyvät kaikki talvikunnossapitoa edeltävät työt, kuten lumisuojiin asennus, sekä lumen ja jään poisto. Erilliskunnossapito pitää sisällään vaihteiden uusimisen ja kierrätyksen sekä routasuojauksen. (Ratahallintokeskus 2000.)



Kuva 14 Vaihteiden kunnossapidon jaottelu (Ratahallintokeskus 2000).

Vaihteen tarkastuksen tarkoituksena on selvittää yksityiskohtaisesti, millaisia kunnossapitotöitä tarkastettu vaihde vaatii. Tarkastuksien ajankohdat määräytyvät vaihteessa käytettävän nopeuden sekä liikenteen määrän perusteella. Jos sallittu nopeus vaihteen suoralla raiteella ylittää 120 km/h tai jos vaihde on hyvin vilkkaasti liikennöity, vaihde tulee tarkastaa neljä kertaa vuodessa. Myös pääraidevaihteet, joissa ajetaan pääosin vain poikkeavan raiteen kautta, vaativat tiheämpiä tarkastuksia. Muilla pääraiteilla sekä pääraiteisiin verrattavissa raiteissa vaihteet on tarkastettava kaksi kertaa vuodessa. Pääraiteen vaihteissa vuoden aikana tehtävistä tarkastuksista ainakin yhden tulee olla laajennettu tarkastus, jossa tarkastetaan normaalien tarkastuskohteiden lisäksi myös hitsaustekniset asiat. (Ratahallintokeskus 2000.)

Vaihteen tarkastuksessa mitataan ensimmäiseksi vaihteen geometria ja tarkistetaan, että mittaustulokset eivät ylitä niille asetettuja akuuttiarvoja. Jos akuuttiarvo ylittyy yhdessäkin kohdassa vaihdetta, vaihteen liikenne on keskeytettävä ja geometria on korjattava välittömästi. Kuvassa 15 on esitetty YV60–300–1:9 vaihteen mittojen nimellisarvot sekä kunnossapidon ja vaihteiden vastaanoton toleranssit. (Ratahallintokeskus 2000.)

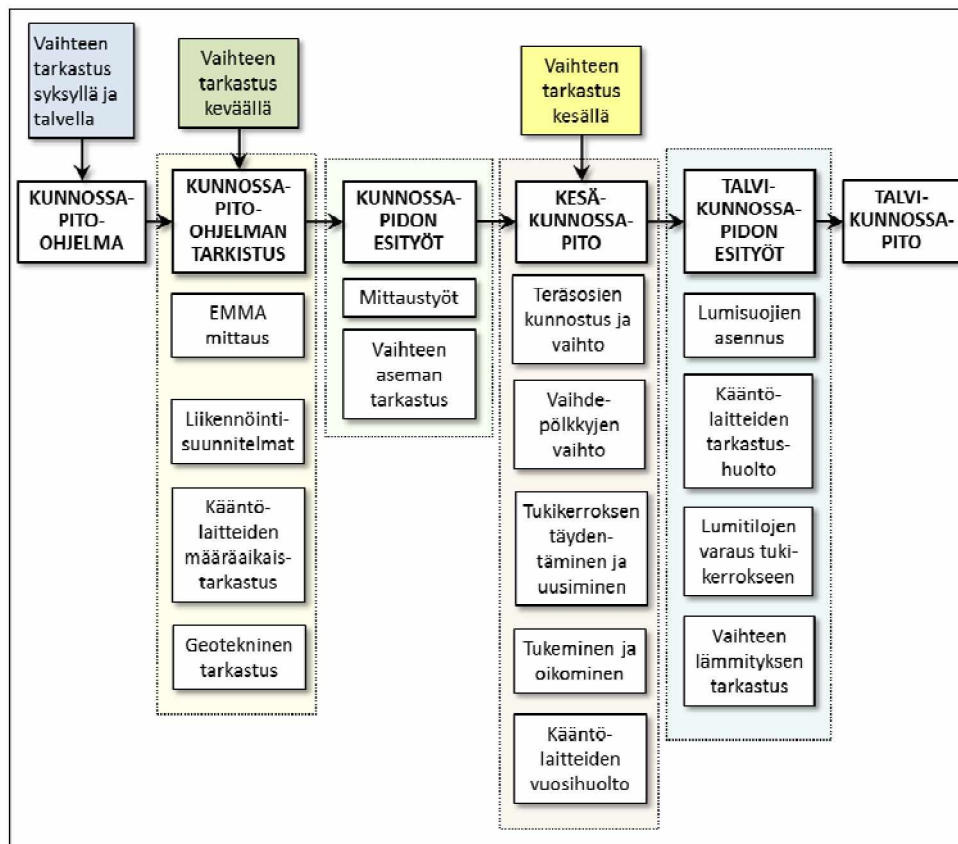
VAIHDETYYPPI	Nimellinen	Työn vastaanottotoleranssit				Kunnossapitotoleranssit				Akuuttiraja	
		uusi		kierrätys		sivuraide		pääraide		+	-
		+	-	+	-	+	-	+	-		
YV60-300-1:9											
a	1524	2	-2	3	-2	7	-3	6	-3	1535	1520
b	1525	2	-2	3	-2	6	-3	5	-3	1532	1520
c 1	1524	2	-2	3	-2	7	-3	6	-3	1535	1520
c 3	1524	2	-2	3	-2	10	-3	6	-3	1535	1520
c 2	1524	2	-2	3	-2	10	-3	7	-3	1547	1520
c 4	1524	2	-2	3	-2	15	-3	15	-3	1547	1520
d 1	1524	2	-2	3	-2	7	-3	6	-3	1535	1520
d 2	1524	2	-2	3	-2	15	-3	15	-3	1547	1520
e 1, 2	1524	1	-2	2	-2	2	-3	2	-3	1527	1519
f 1, 2	1482	2	-1	2	-1	2	-2	2	-2	1486	1478
g 1, 2	1438	0	-1	0	-1	0	-5	0	-4	1440	1432
i 1, 2	44	1	-0	1	-0	4	-1	3	-1	49	41

Kuva 15 Vaihteen mittojen normaaliarvot ja toleranssit.

Geometriamittausten lisäksi vaihteiden kunnossapitotarkastuksiin kuuluvat myös vaihteen tukikerroksen ja muiden rakenneosien tarkastukset. Tarkastuksissa tarkastetaan koko vaihtealue eli alue, joka ulottuu vähintään 50 metrin päähän vaihteen etu- ja takajatkoksista. Tarkastuskohteet ovat:

- raideleveys
- korkeusasema vaihteessa
- kallistus vaihteessa
- sivuttaisasema vaihteessa
- tukikerroksen vajo
- vaihteen tuenta
- yhdyslevyn säätö
- pölkkyjako ja pölkkyjen kulma raiteeseen nähden
- pölkkyjen vaihtotarve
- jatkosraot
- vaihteosien kiinnitykset
- kiinnitykset pölkkyihin
- kielen liittyminen tukikiskoon ja -tönkkiin
- vaihteen lukko
- vaihteen lukitsin
- vaihteen rullalaakerit
- vaihteen voitelu
- vaihteen puhdistus
- kielen säätö
- mangaaniristeysten jäysteet
- kärkivahvistus ja sen eristyksen kunto
- käyttö- ja tarkistustankojen kunto

Kuvassa 16 on esitetty, kuinka vaihteiden kunnossapidon eri vaiheiden tulee edetä vuosittain.



Kuva 16 Vaihteiden kunnossapidon eteneminen vuosittain (Nummelin 1994).

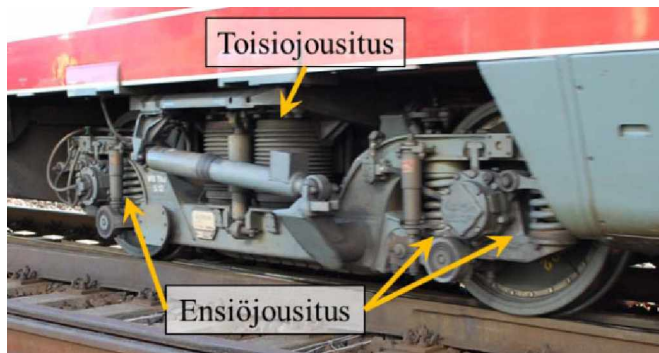
3 Kaluston ja vaihteen vuorovaikutus

3.1 Kalustotyypit

Kiskoilla liikennöivä kalusto voidaan jakaa kahteen päätyyppiin; vetävään ja ei-vetävään kalustoon. Vetävällä kalustolla tarkoitetaan kalustoyksiköitä, jotka tuottavat itse vaunua liikuttavan voiman joko sähkövirran tai dieselpolttoaineen avulla. Ei-vetävällä kalustolla puolestaan tarkoitetaan veturivetoista kalustoa (Andersson et al. 2007.) Vetävä kalusto voidaan edelleen jakaa moottorijuniin ja vetoyksiköihin. Moottorijunia ovat lämpövoimakoneella tai sähkömoottorilla varustetut matkustajajunat, jotka koostuvat yhdestä tai useammasta kalustoyksiköstä. Vetoyksiköt ovat myös lämpövoimakoneella tai sähkömoottorilla varustettuja, mutta ne eivät kykene kuljettamaan hyötykuormaa kuten moottorijunat. Vetoyksiköistä käytetään yleiskielessä nimitystä veturit. Ei-vetävä kalusto voidaan jakaa matkustaja- ja tavaravaunuihin. Matkustajavaunut ovat matkustajia ja matkatavaroita kuljettavia kalustoyksiköitä, joita vedetään moottorijunan tai veturin avulla. Tavaravaunuissa puolestaan kuljetetaan ainoastaan rahtia. (Trafi 2011.)

Suurin osa Suomessa käytössä olevista kiskokalustoyksiköistä koostuu kahdesta pääosasta; vaunun korista sekä teleistä. Telittömiä jäykkärakenteisia vaunuja on Suomessa käytössä ainoastaan tavaraliikenteessä. Telillinen kalusto soveltuu jäykkärakenteista kalustoa paremmin kaarteisiin, sillä teli pääsee kaarteessa kiertymään suhteessa vaunun runkoon ja seuraamaan kaarten geometriaa (Andersson et al. 2007). Teli koostuu pyöristä, niitä yhdistävistä akseleista, jousituksesta ja jarruista sekä moottorivaunuilla myös vetävästä koneistosta. Telin tehtävänä on ohjata vaunua, välittää ja vaimentaa pyöristä raiteeseen kohdistuvia voimia, vaimentaa värähtelyjä sekä vetävissä vaunuissa tuottaa veto- ja jarrutusvoimia. (Iwnicki 2006.)

Telillisen kaluston jousitukseen kuuluvat erilaiset elastiset elementit, vaimentimet sekä niihin liittyvät komponentit, jotka liittävät pyöräkerran vaunun runkoon. Jousitus on toteutettu ensiö- tai toisiojousituksella tai edellisten yhdistelmällä. Ensiöjousituksella tarkoitetaan pyöräkerran ja telin rungon välistä jousituentaä ja toisiojousituksella taas telin rungon ja vaunun rungon välistä jousituentaä. (Iwnicki 2006.)

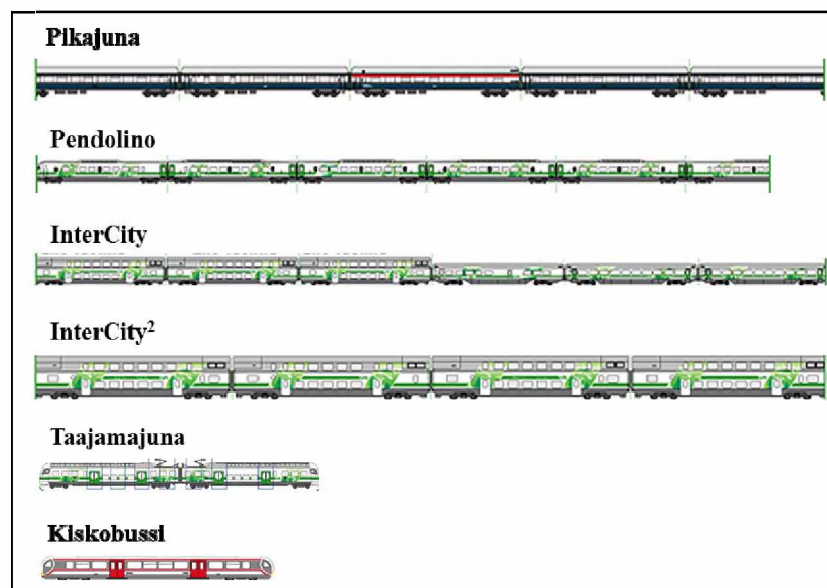


Kuva 17 Ensiö- ja toisiojousitus Pendolino-junan telissä (Eleonoora Salminen 2012).

Taulukossa 2 on esitetty Tampereen ratapihalla liikennöivän suomalaisen matkustajakaluston telityyppejä ja mittoja. Pikajuna ja InterCity-junat ovat veturivetoisia matkustajajunia ja Pendolino-juna, kiskobussi sekä taajamajuna ovat moottorijunia. Pikajunan kokoonpanossa on aina veturi ja viisi vaunua. InterCity-junien kokoonpanoja on puolestaan kaksi erilaista. InterCity-junat koostuvat veturista ja kuudesta vaunusta, joista kolme ensimmäistä ovat kaksikerroksisia ja kolme viimeistä yksikerroksisia. InterCity²-junissa taas on veturin lisäksi kolme tai neljä kaksikerroksista vaunua. (VR 2012.) Yhdessä Pendolino-junassa on aina kuusi vaunua, joista neljässä on vetävät sähkömoottorilla varustetut telit. Junan ensimmäinen ja viimeinen vaunu ovat ohjaamoyksiköillä varustettuja vetäviä matkustajavaunuja. Junan toinen ja viides vaunu ovat vetäviä matkustajavaunuja. Pendolino-junan kolmas vaunu on virroitimella varustettu ravintolavaunu ja neljäs vaunu on virroitimella varustettu matkustajavaunu. Kummassakaan ei ole vetäviä telejä. (Onnettomuustutkintakeskus 2003) Kiskobussin kokoonpanossa voi olla yksi tai kaksi vaunua peräkkäin. Kaikkien kiskobussivaunujen telit on varustettu vetävällä dieselmoottorilla. (VR 2012.) Kuvassa 18 on esitetty Tampereen ratapihalla liikennöivä kalusto.

Taulukko 2 Suomalaisen matkustajakaluston teknisiä tietoja (Hölttä 2012).

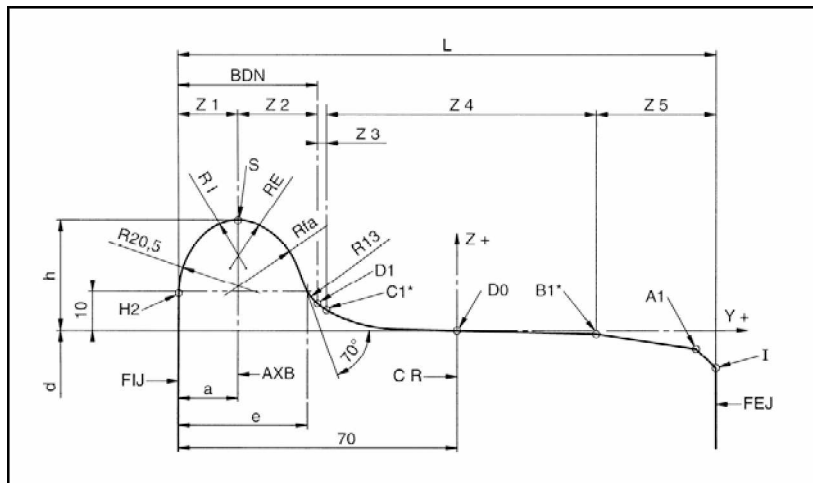
Suomalainen matkustajakalusto					
Nimi	Lyhenne	Vaunun pituus [m]	Telityyppi	Telin akseliväli [m]	Telikeskiöiden väli [m]
Pikajuna	P	26,4	Minden-Deutz	2,5	21,5
Pendolino	Sm3	26,4		2,7	19
InterCity	IC	26,4	SIG-85	2,5	21,5
InterCity ²	IC ²	26,4	TB 201	2,5	21,5
Taajamajuna	Sm4			2,5	
Kiskobussi	Dm12	25,2		2,5	



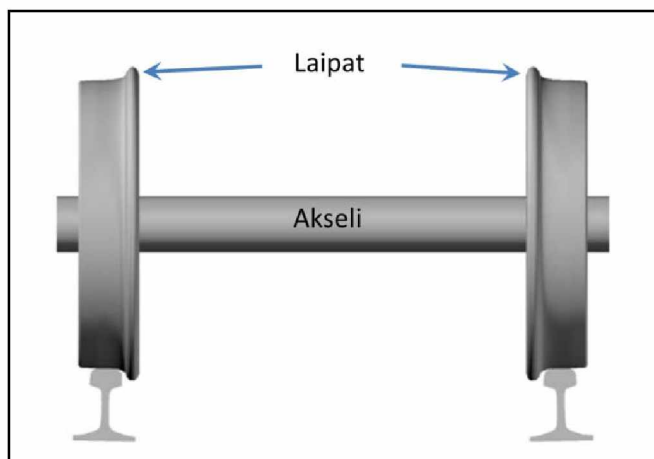
Kuva 18 Tampereen ratapihalla liikennöivä matkustajakalusto (VR 2012b).

3.2 Pyöräprofiili ja pyöräkerta

Suomessa ja muualla Euroopassa rautatiekaluston pyörissä käytetään yleisesti kuvan 19 mukaista eurooppalaisen standardin EN 13715 määrittelemää S1002-pyöräprofiilia (SFS-EN 13715). Tämä pyöräprofiili on sorvattu valmiiksi muotoon, joka muistuttaa kiskon kuluttamaa lievästi kartionmuotoista pyörää. Pyörien sisäpuolella olevat laipat toimivat ratalinjalla ainoastaan varmistuksina suistumista vastaan. Vaihteissa laipat kuitenkin ohjaavat kaluston kulkua erityisesti kieli- ja vastakiskosovituksissa. Jatkuvakiskoraiteisilla radoilla ja uusissa 60E1-vaihteissa kiskot on kallistettu sisäänpäin junan kulun vakavoittamiseksi, jotta kartiokas pyörä ei kuluttaisi ja kuormittaisi kiskoja epäkeskisesti. (Andersson et al. 2007 & Ratahallintokeskus 2002a.) Kuvassa 20 esitettyä kahden pyörän ja yhden jäykän akselin muodostamaa kokonaisuutta kutsutaan pyöräkerraksi.

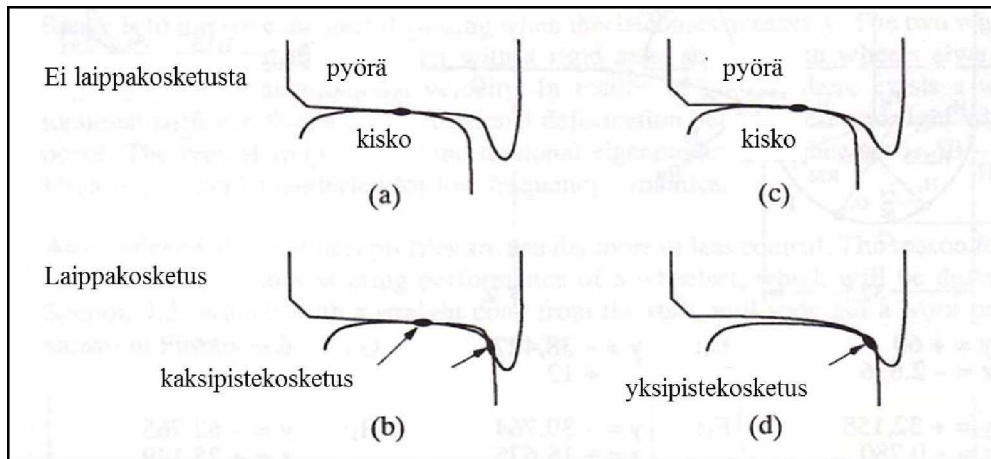


Kuva 19 S1002 pyöräprofiili (SFS-EN 13715).



Kuva 20 Pyöräkerta suoralla raiteella (Hölttä 2011).

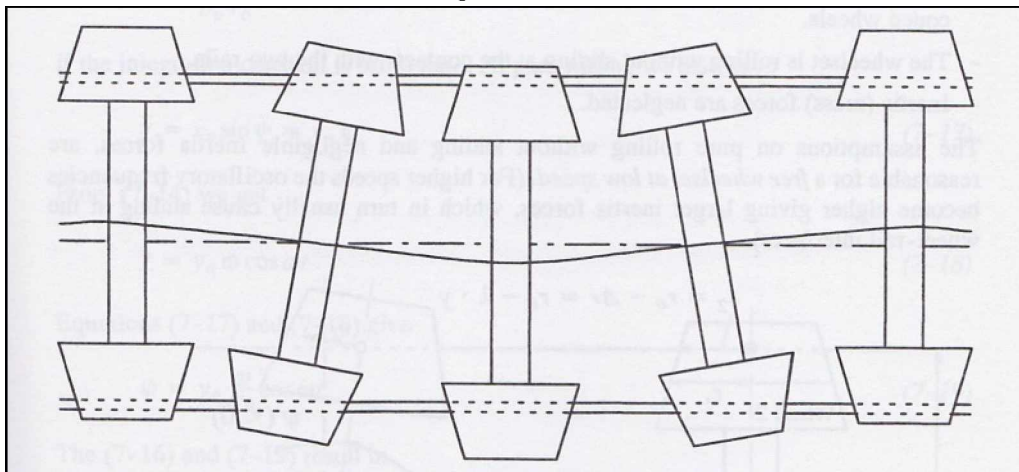
aksi kuluneilla kiskon ja pyörän profiileilla kosketuskohta voi vaihdella nopeastikin paikasta toiseen ja joissakin tapauksissa kosketuskohtia syntyy kaksi. Tällöin puhutaan kaksipistekosketuksesta. (Andersson et al. 2007.) Yksipistekosketus esiintyy tavallisesti vain suoralla radalla (Korkeamäki 2011). Kun pyörän kulkuympyrän säde ja kiskon profiili ovat muuttumattomia kontaktipisteessä, kontaktialue on ellipsin muotoinen. Kontaktialue on kooltaan yleensä noin 1–2 cm². (Andersson et al. 2007.) Eri-laisia pyörän ja kiskon kontaktipisteitä on havainnollistettu kuvassa 22.



Kuva 22 Kiskon ja pyörän kosketus (Andersson et al. 2007).

Pyöräkerran siniliike

Kartiokkuuden takia pyöräkerran pyörien kosketuskohtiin kehittyy vierintäsäde-ero myös suoralla raiteella, kun pyöräkertaan kohdistuu radan pienistä epätasaisuuksista aiheutuvia poikkisuuntaisia voimia. Seurauksena on pyöräkerran jaksoittainen aaltoliike, jonka teoreettisen mallin esitti Klingel vuonna 1883. Tästä aaltoliikkeestä käytetään Suomessa sen muodosta johdettua nimitystä pyöräkerran siniliike. Muualla maailmassa se tunnetaan termillä Klingel movement. (Esveld 2001.) Pyöräkerran sini-liikettä on havainnollistettu kuvassa 23.



Kuva 23 - Pyöräkerran siniliike (Andersson 2007).

Sinikäyrän aallonpituus on riippuvainen pyörän kulkuympyrän säteestä, kulkuympyröiden välimatkasta tasapainotilassa sekä kartiokkuudesta seuraavasti

$$l = 2\pi \sqrt{r_0 \frac{s}{2\lambda}}, \text{ missä} \quad (5)$$

l on sinikäyrän aallonpituus [m]

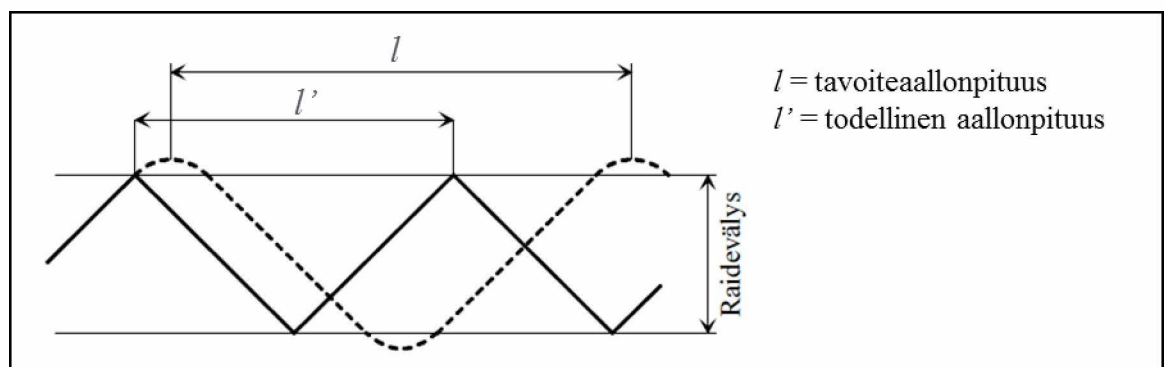
r_0 junan pyörän kulkuympyrän säde [m]

s junan pyörien kulkuympyröiden välimatka tasapainotilassa [m]

λ pyörien kartiokkuus

Pyöräkerran siniliikkeen yhtälö on täysin kinemaattinen, eli ulkoiset voimat eivät vaikuta sen johtamiseen. Yhtälö ei ota huomioon kytkettyjen akselien, junan painon tai pyörän ja kiskon välisten tartuntavoimien vaikutuksia. Todellisuudessa pyöräkerran siniliikkeen amplitudi on riippuvainen raiteen geometriasta, kaluston dynaamisesta käyttäytymisestä sekä kaluston nopeudesta. (Esveld 2001.)

Pyöräkerran siniliikkeen aallonkorkeus suurenee nopeuden kasvaessa. Kun nopeus saavuttaa arvon, jossa siniliikkeen aallonkorkeus on puolet raidevälisestä, syntyy laippakosketus. Siniliike muuttuu aaltomaisesta siksak-muotoiseksi ja seurauksena on erittäin huono matkustusmukavuus (Kuva 24). Ilmiöstä käytetään englannin kielessä nimitystä hunting. (Esveld 2001.) Tämän epästabiilin liikkeen aikaansaavaa nopeuttaa kutsutaan kriittiseksi nopeudeksi (Liikennevirasto 2010a).



Kuva 24 Laippakosketuksen vaikutus pyöräkerran siniliikkeeseen (Liikennevirasto 2010a).

Tehollinen kartiokkuus

Tehollisella kartiokkuudella tarkoitetaan pyöräkerran ja raiteen todellisista mitoista ja keskinäisistä asennoista määriteltyä laskennallista kartiokkuutta, jonka avulla määritetty siniliikkeen aallonpituus vastaa pyöräkerran todellista siniliikkeen aallonpituutta. Tehollisella kartiokkuudella on suuri merkitys kaluston kulun tasaisuuteen, varsinkin suurilla, yli 160 km/h nopeuksilla. Tehollinen kartiokkuus lasketaan seuraavilla kaavoilla: (Liikennevirasto 2010a.)

$$\lambda = \tan \gamma = r_0 G \left(2 \frac{\pi}{L_s}\right)^2 \quad (6)$$

$$\lambda_s = r_0 \frac{S}{L_s} \left(2 \frac{\pi}{L_s}\right)^2, \text{ joissa} \quad (7)$$

L_s on siniliikkeen aallonpituus [m]

γ kartiokulma [°]

λ kartiokkuus

λ_s todellista siniliikkeen aallonpituutta vastaava tehollinen kartiokkuus

r_0 kulkuympyrän säde tasapainotilassa [m]

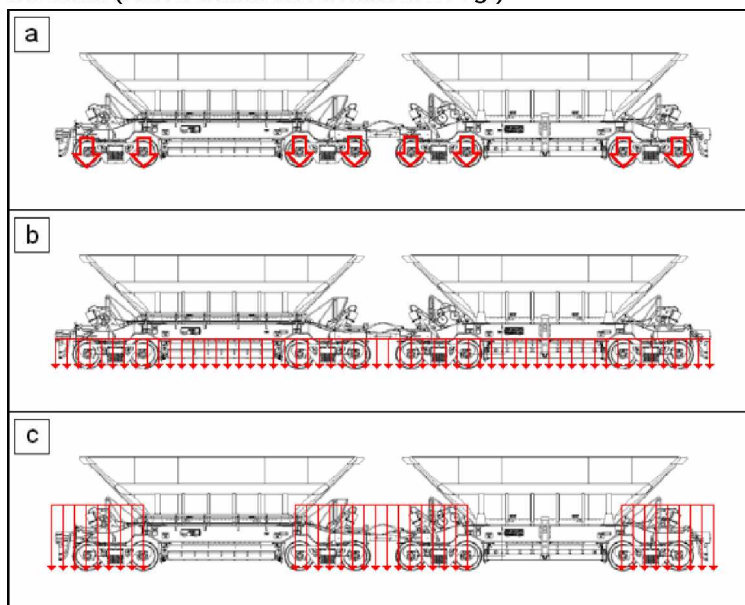
S kulkuympyröiden välinen etäisyys [m]

G raideleveys [m]

Suuri tehollinen kartiokkuus aiheuttaa pyöräkerran epästabiilia kulkua radalla nopeuden kasvaessa. Toisaalta liian pieni tehollinen kartiokkuus johtaa pyöräkerran ohjautuvuuden pienenemiseen erityisesti kaarteissa, mistä myös aiheutuu epästabiilia liikettä pyöräkerran kulussa. Yli 160 km/h nopeuksilla tehollisen kartiokkuuden tulisi pysyä eri kalustoilla raja-arvojen 0,1–0,3 välissä. (Liikennevirasto 2010a.)

3.3.2 Kalustosta rataa kohdistuva kuormitus

Kaluston akseleista ratapenkereeseen kohdistuva todellinen kuormitus riippuu akselien sijainnista. Mitä lähempänä akselit ja teli ovat toisiaan, sitä suuremmaksi niiden yhteisvaikutus kasvaa. Teliien sijoittumisen, vaunujen pituuden sekä akselikuormien vaikutusta voidaan vertailla tarkastelemalla kahden peräkkäisen telin aiheuttamaa metrikuormaa. Kuvassa 25 tarkastellaan akselikuorman, metrikuorman sekä teliparin metrikuorman kuormitusjakaumia. Kahden peräkkäisen telin eli teliparin aiheuttama metrikuorma lasketaan kahden peräkkäisen telikuorman summan suhteena teliparin kauimmaisten akselien väliseen etäisyyteen. Tällä tavoin teliparin metrikuormaa voidaan pitää radan rasituksen kannalta metrikuormaa määräävämpänä parametrina. (Korkeamäki & Nurmikolu 2009.)

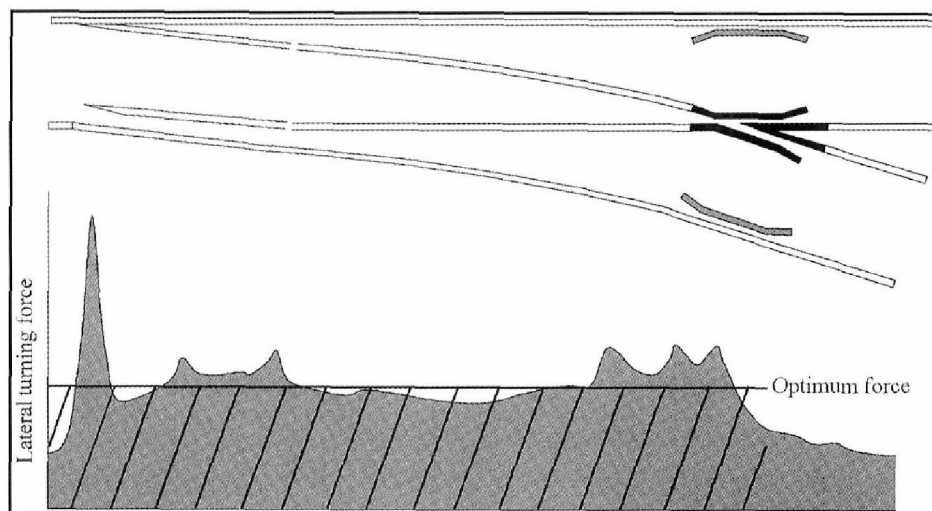


Kuva 25 Akselikuorman (a), metrikuorman (b) ja teliparin aiheuttaman metrikuorman (c) vertailu. (Korkeamäki & Nurmikolu 2009).

Kaluston pyörän kannatteleva paino määrittää kiskoon kohdistuvan staattisen pyöräkuorman suuruuden. Epäkeskisyyden takia yhden pyöräkerran pyöriin kohdistuvat kuormitukset eivät välttämättä ole yhtä suuria. Pyöräkuorman suuruuteen vaikuttavien tekijöiden määrä lisääntyy junan ollessa liikkeessä. Tavallisimmat kaluston aiheuttamat hetkelliset kuormituslisäykset johtuvat pyörä-kiskokontaktin epätasaisuudesta. (Korkeamäki 2011.)

Vaihteessa suurimmat kalustosta johtuvat kuormat syntyvät kielisovituksessa sekä risteyksessä. Vastavaihteeseen ajettaessa kielisovituksen kärjissä syntyy suuria poikittaissuuntaisia voimia, kun kiskoprofiili ja radan kaarevuus muuttuvat vaihteeseen tultaessa äkillisesti. Vaihteen risteyksessä taas siipikiskon ja risteyksen kärjen välinen epäjatkuvuuskohta voi synnyttää suuria iskumaisia kuormia. (Pålsson & Nielsen 2012.)

Bonaventura et al. (2004) selvittivät tutkimuksessaan, miten vaihteen poikkeavan raitteen suurinta sallittua nopeutta voitaisiin nostaa mahdollisimman vähäisillä ja huokeilla toimenpiteillä muuttamatta vaihteen pituutta. Tutkimuksessa todetaan, että poikkeavalla raiteella sallittu nopeus perustuu osittain kiskon ja pyörän välille syntyvän poikittaissuuntaisen voiman suuruuteen. Tämän poikittaissuuntaisen voiman suuruutta vaihteen läpi ajettaessa havainnollistetaan kuvassa 26. Kuvasta voidaan havaita, että suurin poikittaisvoima syntyy kielien kärjissä ja sen aiheuttaa yhtäkkiäinen pyöräkerran vierintäkulman muutoksesta suoran kiskon ja kielen kärjen välillä. Muut suuremmat poikittaisvoiman nousut syntyvät kielien kantojen ja risteyksen kohdalla. Tasoittamalla poikittaisvoiman jakautumista vaihteen pituudella voidaan vaihteessa sallittua nopeutta nostaa. Tutkimuksessa junan kaluston kulkuominaisuudet paranivat huomattavasti eräällä testatulla vaihteen geometrialla, jossa vaihteessa oli hyvin pieni sisäänajokulma ja yhtenäinen kaari.

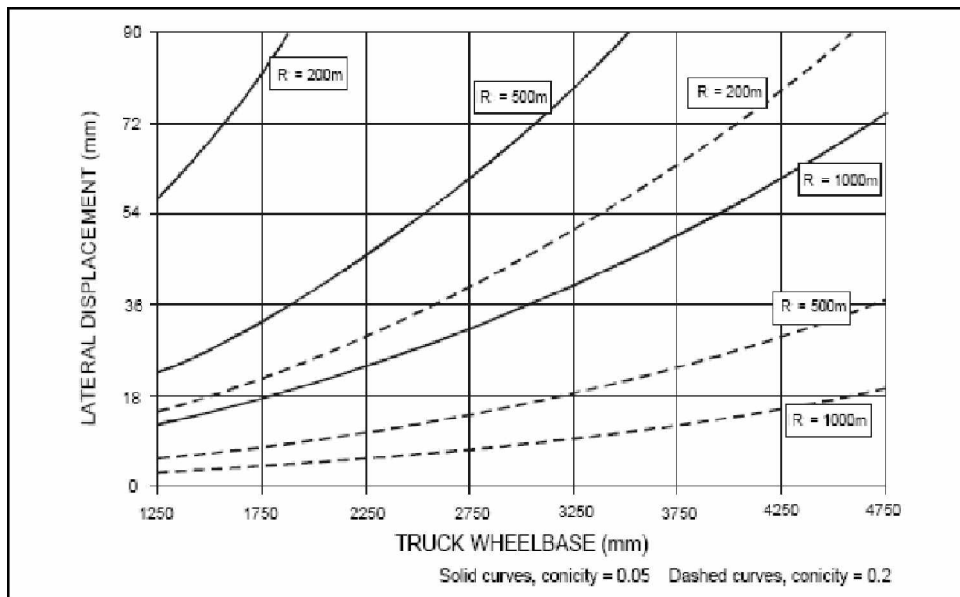


Kuva 26 Kiskon ja pyörän vuorovaikutuksesta syntyvän poikittaisvoiman suuruus vaihteessa (Bonaventura et al. 2004).

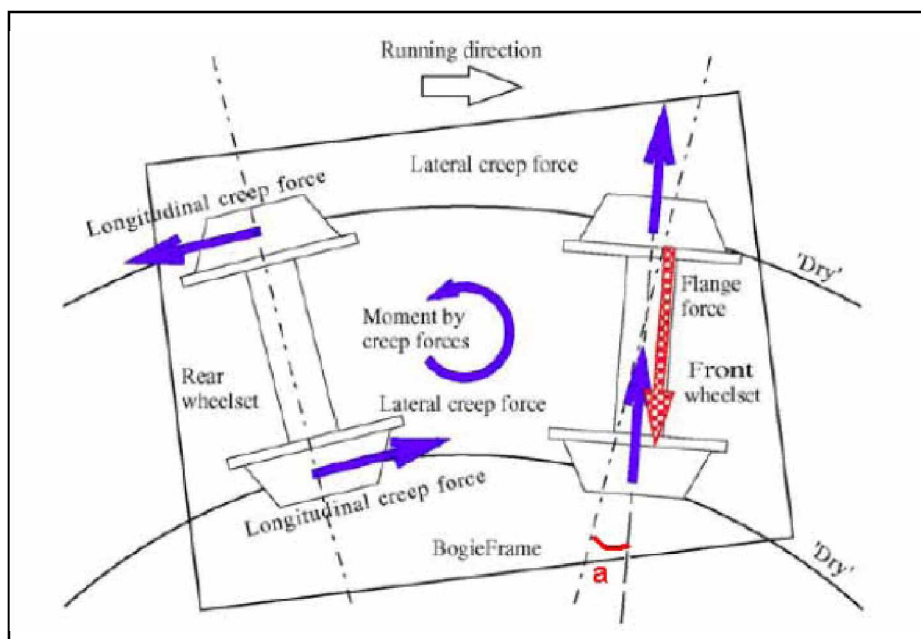
3.3.3 Telien ohjautuminen vaihteessa

Telin pyöräkertojen akselien välisellä etäisyydellä on vaikutuksia telin kaarreominaisuuksiin. Kun telin akseliväli on lyhyt, teli kykenee ohjautumaan pienisäteisistä kaarteista ilman laippakosketusta. Vaunun ajovakaus muodostuu kuitenkin silloin ongelmaksi. (International Heavy Haul Association 2001.)

Kuvassa 27 on esitetty miten telin akseliväli vaikuttaa vaunun kaarreominaisuuksiin erilaisilla pyörän kartiokkuuksilla. Y-akselilla on jäykän telin tarvitsema sivusiirtymä kaarteissa ja x-akselilla telin akseliväli. R-arvot kuvaavat erilaisia kaarresäteitä ja kiinteät ja katkoviivat eri kartiokkuuksia. Kuvasta nähdään, että pidemmällä akselivälillä kaarteissa tarvittavan sivusiirtymän suuruus kasvaa.



Kuva 27 Y-akselilla jäykän telin tarvitsema sivusiirtymä kaarteissa ja x-akselilla telin akseliväli. (International Heavy Haul Association (2001), Korkeamäen (2011) mukaan).



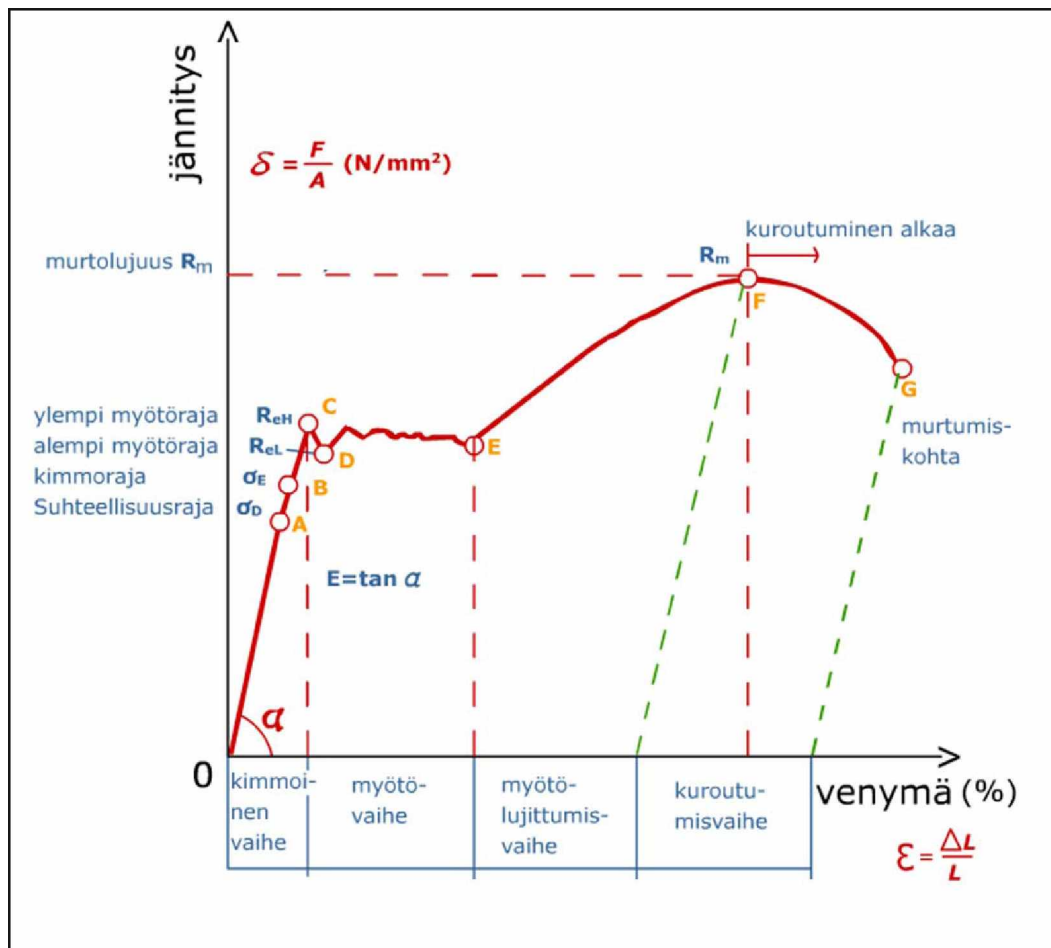
Kuva 28 Telin pyörien ja kiskon kontaktivoimat pienisäteisessä kaarteissa (Lainattu muokattuna lähteestä Matsumoto et al. 2005).

Kuva 28 havainnollistaa kiskon ja telin pyörien välisiä kontaktivoimia kaarteessa. Kunteli ei kykene ohjautumaan kaarteessa riittävästi, ohjaavan pyöräkerran ulkokiskonpuoleisen pyörän ja ulkokiskon välille syntyy laippakosketus. Laippakosketuksesta syntyy voima (flange force) ja ohjaavan pyöräkerran akselin suunnan sekä kosketuspisteen tangenttia vastaan kohtisuoran suunnan välille muodostuu kohtauskulma (angle of attack). Kohtauskulman suuruus määrittää laippakosketuksen vakavuuden sekä pyöräkerran poikittaissuuntaisen luiston ja siitä aiheutuvan voiman (lateral creep force) suuruuden. Kuvassa 28 on esitetty liiallisen sivuttaissiirtymän tilanne, jossa taaemman pyöräkerran pyöriin kehittyvä vierintäsäde-ero on suurempi mitä sisä- ja ulkokiskojen välinen matkaero edellyttäisi. Pyöräkerran pyörien välisen vierintäsäde-eron ollessa suurempi kuin pyörien sisä- ja ulkokiskoilla kulkemien matkojen välinen ero, on pyöräkerran pyörien tasattava kehittyvää matkaeroa pituussuuntaisella luistolla, josta aiheutuu pituussuuntainen voima (longitudinal creep force).

4 Raideruuvit

4.1 Materiaaliominaisuudet ja lujuusvaatimukset

Kiskonkiinnityksissä käytettävät raideruuvit ovat tyypiltään R170-P. Liitteessä 1 on esitetty raideruuvin tyyppipiirustus. Raideruuvit valmistetaan rakenneteräksestä. Teräs on raudan ja hiilen seos, jossa hiilipitoisuus on alle 2,1 %. Lisäksi teräksissä on pieniä pitoisuuksia muita seosaineita, kuten mangaania. Rakenneteräksien hiilipitoisuus on yleensä 0,12–0,2 %. (TTY 2005.) Tavallisilla vähähiilisillä rakenneteräksillä on verrattain matala lujuus, mutta hyvät sitkeysominaisuudet (Dowling 2007, s. 59).



Kuva 29 Esimerkki S355-rakenneteräksen jännitys-venymä -kuvaajasta (Lilja 2009).

Raideruuvien tärkeimpiä mekaanisia ominaisuuksia ovat myötölujuus ja vetomurtolujuus. Ruuvien myötö- ja murtolujuus määritetään vetokokeella, joka tehdään ruuvista muotoillulle koesauvalle. Kuvassa 29 on esimerkki vetokokeen tuloksena saatavasta materiaalin jännitys-venymä -kuvaajasta. Jännitys-venymä -kuvaajalla murtolujuus (R_m) on kuvaajan korkeimmalla kohdalla sijaitseva nimellisjännitys. Murtolujuus kuvaa suurinta mahdollista kuormaa, jolla ruuvia voidaan vetää ennen kuin se katkeaa. Myötölujuus (R_e) on se jännitys, jossa sauvan muodonmuutos muuttuu kimmoisesta plastiseksi. Jännitys-venymä -kuvaajalta voidaan havaita sekä ylempi (R_{eH}) että

alempi (R_{eL}) myötöraja. Ylempi myötöraja on se jännitys, jossa metallin niin kutsuttu myötö eli plastinen muodonmuutos alkaa. Alempi myötöraja puolestaan kertoo pienimmän jännityksen myötöalueella. Myötölujuuden arvona käytetään ylempää myötörajaa.

Muita raideruuvien ominaisuuksia kuvaavia suureita ovat murtovenymä ja kurouma. Murtovenymä kertoo koesauvan venymän prosentteina. Murtovenymä on yleisimmin käytetty metallien sitkeyttä kuvaava suure. Murtovenymä (A_5) määritetään seuraavasti:

$$A_5 = (L_u - L_0) / L_0 \times 100\% \quad (8)$$

$$L_0 = 5 \times d_0, \text{ missä} \quad (9)$$

L_0 on koesauvan määritelty mittapituus

L_u koesauvan mittapituus murtumisen jälkeen

d_0 koesauvan varren halkaisija ennen vetokoetta.

Kun metallin muokkauslujittuminen ei enää pysty korvaamaan pysyvän venymän aiheuttamaa poikkipinnan pienenemistä, vetosauva alkaa kuroutua. Kuroutumisen suuruus kuvastaa aineen kykyä kestää murtumatta plastista muokkausta. Murtokurouma lasketaan seuraavasti:

$$Z = \frac{S_0 - S_u}{S_m} \times 100 \%, \text{ missä} \quad (10)$$

S_0 on sauvan poikkileikkauksen pinta-ala

S_u murtumakohdan pinta-ala.

Raideruuvien lujuusluokka ilmoitetaan muodossa A.B, jossa

$$A = R_m / 100 \quad (11)$$

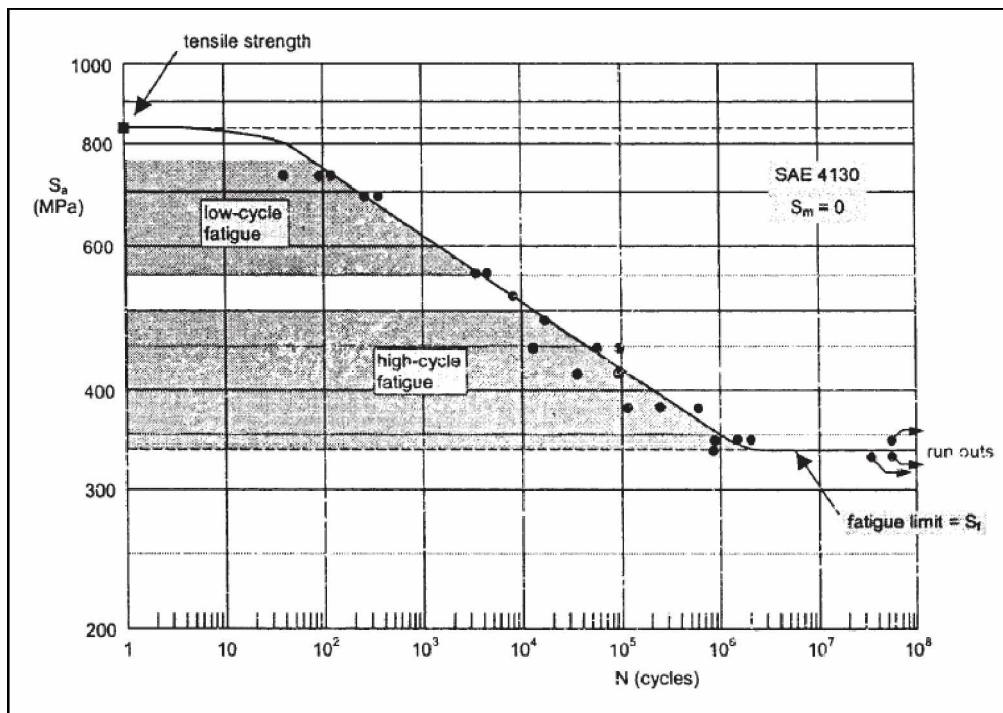
$$B = R_e / R_m \times 10 \quad (12)$$

Raideruuvien lujuusluokka on määritetty RATO-ohjeiden osassa 4 Vaihteet (Ratahallintokeskus 2000), sekä uusina hankittavia 54E1- ja 60E1-vaihteita koskevissa teknisissä toimitusehdoissa (Liikennevirasto 2010b). RATO-ohjeiden mukaan R170-P-raideruuvien lujuusluokan tulee olla vähintään 5.6. Uusina hankittavia 54E1- ja 60E1-vaihteita koskevissa teknisissä toimitusehdoissa ei oteta kantaa raideruuvien lujuusluokkaan, mutta määräyksissä kuitenkin todetaan, että lujuusluokka on merkittävä näkyviin raideruuvien kantaan. Lisäksi ohjeessa viitataan raideruuvien tyyppipiirustuksen 4022-1-501 versioon B (Liite 3). Tässä raideruuvien tyyppipiirustuksessa on edellisistä ohjeista poiketen annettu ruuvien lujuusluokaksi 4.6. Lisäksi piirustuksessa ohjeistetaan raideruuvien kantaan merkittäviksi tiedoiksi raideruuvien valmistusvuosi, valmistavan tehtaan tunnus, sekä ruuvien tyyppi, mutta lujuusluokan merkitsemisestä ei ole mainintaa. Piirustusta ei ole kuitenkaan päivitetty vuoden 1980 jälkeen, joten myöhemmin voimaan tulleet ohjeet kumoavat siinä esitetyn ohjeistuksen, niiltä osin kuin se on muuttunut.

ASTM Internationalilla on pelkästään raideruuveja koskeva standardi A66-07, joka määrittää raideruuvien murtolujuuden alarajaksi 415 MPa ja myötörajan alarajaksi 205 MPa.

Väsymisilmiö

Väsyminen on materiaalin vaurioitumista pitkäaikaisen vaihtokuormituksen alaisena. Väsyminen voidaan jakaa kahteen päätyyppiin: Jännityksen kontrolloimaan varsinaiseen väsymiseen (high cycle fatigue) ja venymän kontrolloimaan myötöväsymiseen (low cycle fatigue). High cycle-väsymisessä jännitykset pysyvät materiaalin myötörajan alapuolella ja tällöin materiaali kestää murtumatta enemmän kuin 10 000 toistuvaa kuormituskertaa. Yksi kuormituskerta ei siten itse ole tarpeeksi voimakas aiheuttakseen materiaaliin vaurioita, vaan kuormitus syklien tulee olla pitkällä aikavälillä toistuvia ennen lopullisen murtuman syntymistä. Myötöväsymisessä jännitykset ylittävät materiaalin myötörajan, jolloin murtumaan johtavien kuormituskertojen määrä on pienempi, alle 10 000 kuormituskertaa. (Laurila 2012.)



Kuva 30 Säröttömän niukkaseosteisen teräksen väsymistestin tulokset ja tulosten perusteella määritetty S-N – käyrä (NACA TN 2324, 1951, Schijven (2003) mukaan).

Murtumaan johtavien kuormanvaihtokertojen lukumäärä riippuu jännityksen amplitudista ja keski-jännityksestä. Suurilla kuormanvaihtokerroilla murtumaan johtavaa jännitysamplitudia kullekin kuormanvaihtokertojen lukumäärälle kuvataan S-N-käyrällä. (Niemi 2010.) Käyrän avulla voidaan arvioida materiaalin väsymisenkestoa ja käyttöikää (eFunda 2012). Kuvassa 30 on esitetty säröttömän niukkaseosteisen teräksen väsymistestien tulokset sekä tulosten perusteella määritetty S-N-käyrä. Kuvassa on myös esitetty high cycle- ja low cycle-väsymisen alueet.

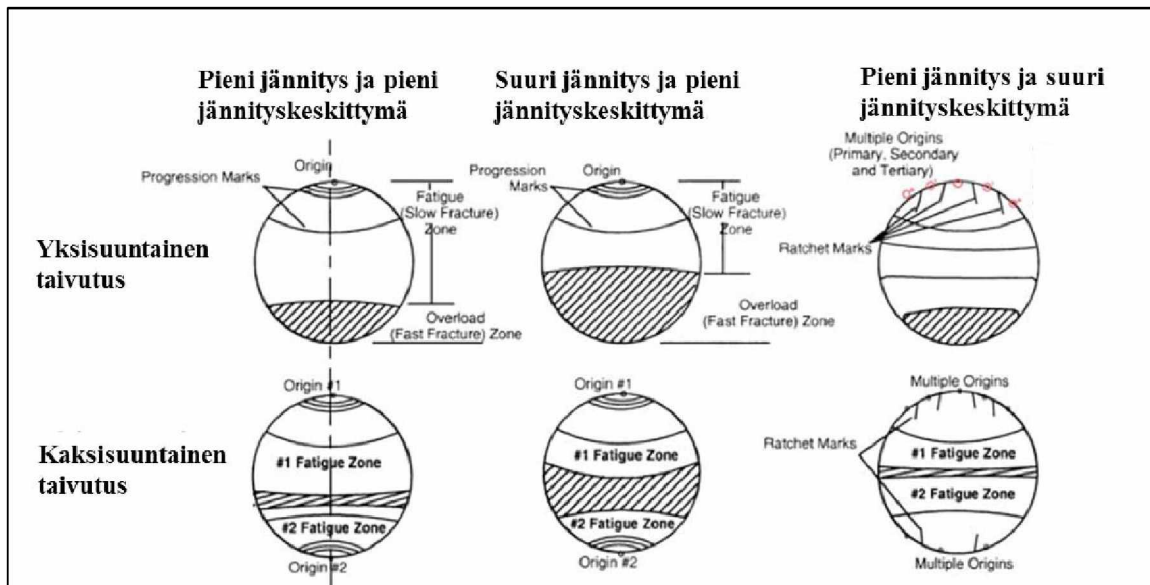
Materiaalin väsymislajuuteen vaikuttavia tekijöitä on esitelty taulukossa 3 (Niemi 2010 & Bhat et al. 2007):

Taulukko 3 Väsymislujuuteen vaikuttavia tekijöitä

Materiaalin väsymislujuuteen vaikuttavia tekijöitä	
TEKIJÄ	HUOMIO
<i>Murtolujuus</i>	Murtolujuuden kasvaessa kriittinen särökoko ja sitkeys pienenevät
<i>Keskijännitys</i>	
<i>Sitkeys</i>	
<i>Pinnan laatu</i>	Epäjatkuvuuskohtiin syntyy kuormakeskittymiä
<i>Mikrorakenne</i>	Suurirakeisella materiaalilla on alhainen myötölujuus ja alhainen väsymislujuus, pienirakeisella taas suuri myötölujuus ja suuri väsymislujuus
<i>Lämpötila</i>	Lujuus laskee lämpötilan kasvaessa
<i>Raekoko</i>	
<i>Korroosio</i>	Kosteat ja syövyttävät olosuhteet edesauttavat alkusärön ydintymistä ja nopeuttavat säröjen etenemistä

Väsymisprosessi etenee kolmessa vaiheessa. Ensimmäisessä vaiheessa kappaleeseen syntyy eli ydintyy mikroskooppisia säröjä. Mikroskooppiset alkusäröt syntyvät yleensä paikallisten jännityshuippujen kohdalle kuten ruuvien kierteisiin ja paikallisiin pinta- tai materiaalivikoihin. (Lähteenmäki 2012.) Materiaalissa voi olla mikroskooppisia säröjä kuten hilavirheitä myös valmistusteknisistä syistä. Ydintymistä seuraa mikroskooppisten säröjen kasvu ja laajentuminen makroskooppisiksi säröiksi. (Kantola 1986.) Makroskooppisten säröjen leviäminen tapahtuu hyvin hitaasti asteittain. Säröjen etenemisnopeus riippuu kuormituksen suuruudesta sekä kappaleen geometriasta. Kun särö on edennyt tarpeeksi pitkälle, materiaali murtuu äkillisesti. (Bhat et al. 2007.)

Väsymällä murtuneen kappaleen murtopinnat ovat yleensä hyvin tasaisia, eikä niissä ole havaittavissa suuria plastisia muodonmuutoksia. Lisäksi väsymällä murtuneen materiaalin murtopinnoissa voidaan yleensä erottaa väsymisen kolme erillistä vaihetta; murtuman ydintymiskohta ja hitaan kasvun alue, säröjen pysähtymis- ja yhtymisjäljet (progression and ratchet marks) sekä lopullisen murtuman alue. (Niemi, 2010.) Kuvassa 31 on esitetty erilaisia väsymällä murtuneiden kappaleiden murtopinnoissa tyypillisesti havaittavia jälkiä. Kaikissa väsymällä murtuneissa kappaleissa ei kuitenkaan aina havaita selviä pysähtymis- tai yhtymisjälkiä (Bhat et al. 2007).



Kuva 31 Väsymismurtuman jäljet (Lainattu muokattuna lähteestä Sachs 2005).

4.2 Tutkimuksia raideruuveista

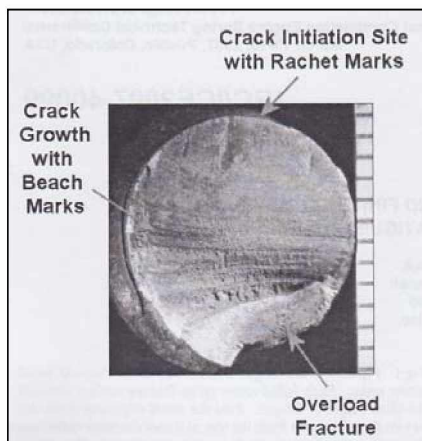
Tim Austinin (2007) mukaan Pohjois-Amerikassa akselipainojen nousu ja tavaraliikenteen määrän lisääntyminen on johtanut siihen, että vaihteissa ja kaarteissa syntyvät suuret poikittaisvoimat ylittävät helposti raideruuvien kestävyysvastustaa raitteen liikettä. Siksi raideruuvien kokoa ja lujuutta on kasvatettu, ja materiaalin laatua on pyritty hallitsemaan paremmin. Austin kritisoi ASTM:n raideruuvistandardia A66 siitä, että se määrää ainoastaan ruuvien minimilujuuden 415 kPa (60000 psi), antaa joitakin ohjeita ruuvien testaukseen sekä määrittää toleransseja, mutta ei ota kantaa ruuvien ulkomuotoon, mittoihin tai kemialliseen koostumukseen.

Austin toteaa, että raideruuvien jännitystilaa kuormituksen alaisina ei tunneta kovin hyvin. Katkenneita ruuveja on hänen mukaansa havaittu usein ryppäittäin ja vallitseva käsitys on, että yksi tai muutama katkennut ruuvi tekee vierekkäisistä ruuveista alttiimpia vaurioille. Seurauksena on ketjureaktio, jossa samalta alueelta katkeaa useampia ruuveja. Austinin mukaan on myös epäselvää, onko ruuvien katkeaminen jottenkin yhteydessä ruuvien ominaisuuksiin, asennusprosessiin tai muihin rataolosuhteiden aiheuttamiin tekijöihin. Ruuveilla on taipumus vähitellen löystyä puupölkkyssä dynaamisen kuormituksen alaisina, mikä johtaa lopulta katkeamiseen. Huonosti kiinnitettyjen kiskojen tiedetään myös rikkoneen raideruuveja kaarteissa ja vaihteissa, kun kisko on liikkunut lämpölaajenemisen seurauksena.

Yhdysvaltalaiset Dick et al. (2007) tutkivat puupölkkytetyn radan raideruuveihin kohdistuvia taivutuskuormia kehittämällä kokeellisella menetelmällä, tavoitteenaan ymmärtää paremmin ruuvien katkeamista. Tutkimuksen mukaan raideruuvit katkeavat kiskokaluston poikittaissuuntaisten voimien aiheuttaman taivutusväsymisen seurauksena. Kuvassa 32 on havainnollistettu ehjä ja katkennut raideruuvi sekä niiden mitat.



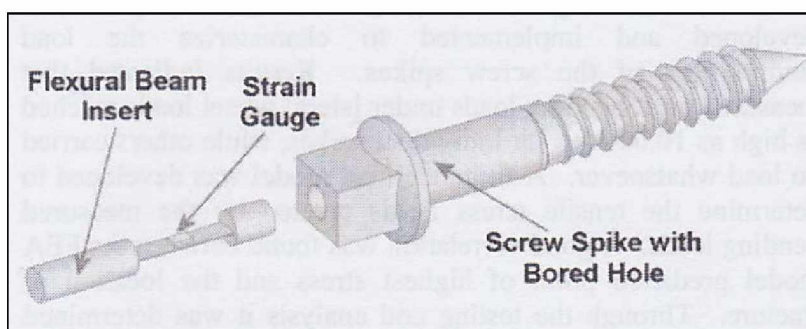
Kuva 32 Ehjä ja katkennut raideruuvi, mitat ovat tuumissa (Dick et al. 2007.)



Kuva 33 Katkenneen ruuvien murtopinta (Dick et al. 2007.)

Kaikkien tutkimusta varten tarkasteltujen ruuvien murtopinnoissa voitiin havaita väsymismurtuman kolme vaihetta (Kuva 33). Veto- ja lujuuskokeissa ruuvit täyttivät niille asetetut vaatimukset, kun maksimiveto- ja lujuuden vaatimus oli 120 ksi eli 827 MPa. Ruuvien kemiallinen koostumus vastasi vähähiilistä, niukkaseosteista terästä. (Dick et al. 2007.)

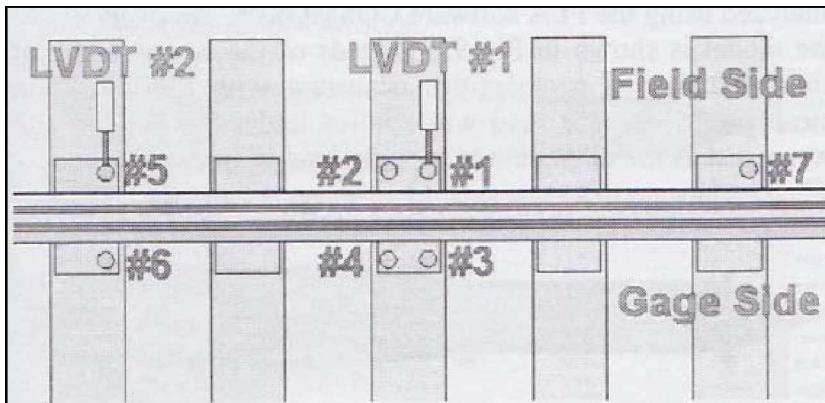
Tutkimuksessa ruuviin kohdistuvia voimia haluttiin mitata aiheuttaen mahdollisimman vähän muutoksia kiskonkiinnityksiin ja radan rakenteisiin. Mittaus toteutettiin käyttäen kuvan 34 mukaista, ruuvien sisälle porattuun reikään asetettavaa, keskeltä ohuempaksi sorvattua, sylinterinmuotoista sovitinta, johon venymäliuska liimattiin. Näin ruuvien taipuessa myös sovittimeen kohdistui identtinen taipuma, joka voitiin rekisteröidä venymäliuskalla. (Dick et al., 2007.)



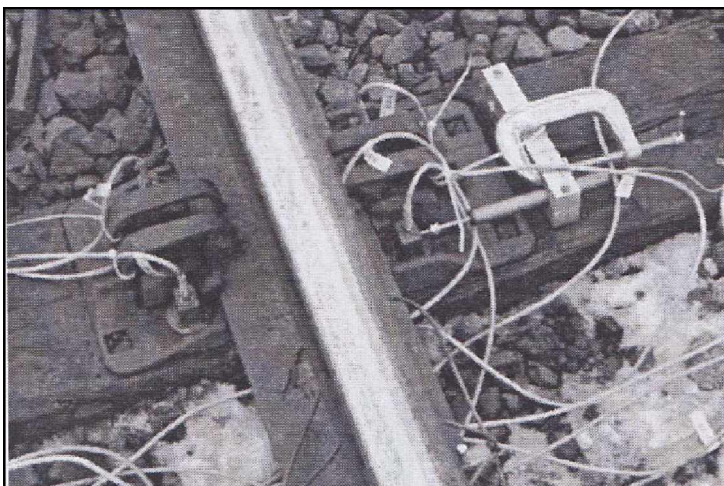
Kuva 34 Ruuvien instrumentointi venymäliuskalla (Dick et al. 2007.)

Ennen rataan asentamista instrumentoidut ruuvit kalibroitiin laboratoriossa ja jokaiselle ruuville luotiin omat jännitys-venymä-, siirtymä-venymä- sekä jännitys-siirtymä-kuvaajat. Kalibroinnin aikana todettiin, että kaikki seitsemän instrumentoitua ruuvia käyttäytyivät hiukan eri tavalla ja kuvaajissa oli havaittavissa lievää hajontaa. Tämä hajonta oli kuitenkin odotettua ja sen tiedettiin johtuvan venymäliuskan ja sovittimen asennukseen liittyvään vaihteluun. (Dick et al. 2007.)

Instrumentoidut ruuvit asennettiin ulkokiskoon 10 asteen kaarteeseen, vuoristoisella alueella sijaitsevalle puupölkkyradalle. Alustavien kenttämittausten aikana huomattiin, että puupölkyn jäykkyys ruuvien ympärillä vaikutti huomattavasti ruuveista mitattuihin taipumiin. Lisäksi puupölkkyjen kiskonkiinnitysten kunto maastossa oli huomattavasti erilainen verrattuna laboratoriossa käytettyjen puupölkkyjen kiskonkiinnityksiin. Niinpä kalibrointi suoritettiin uudelleen käyttäen elementtimenetelmällä tehtyä mallia, hyödyntäen alustavista siirtymä- ja venymämittauksista saatua tietoa. Kuvissa 35 ja 36 on esitetty instrumentoitujen ruuvien sijainti kiskonkiinnityksessä. Kahden ruuvien yläpään liikettä mitattiin lisäksi siirtymämittarilla (kuvassa LVDT). (Dick et al. 2007.)



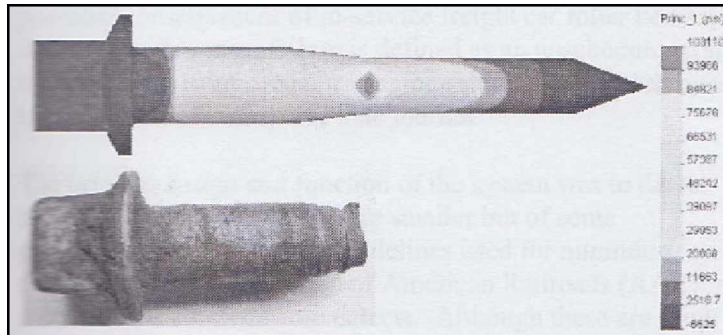
Kuva 35 Instrumentoitujen ruuvien sijainti (Dick et al. 2007).



Kuva 36 Instrumentoidut ruuvit kiskonkiinnityksessä (Dick et al. 2007).

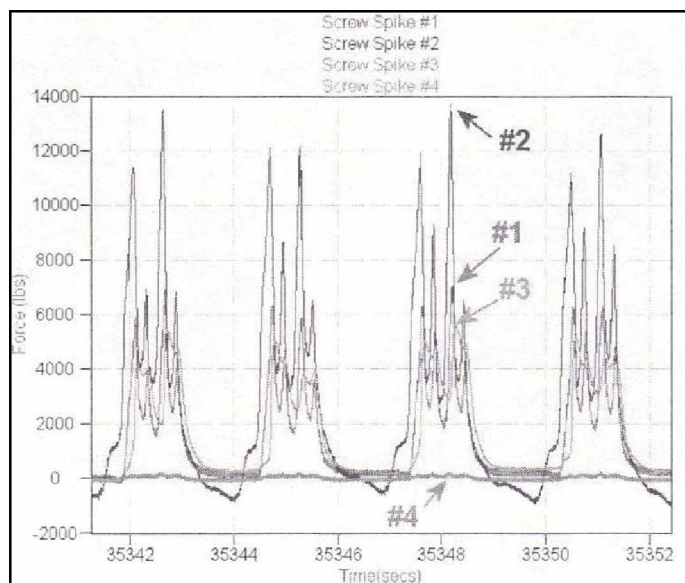
Mittausdata kerättiin Somat eDAQ-tiedonkeräyslaitteistolla (electronic data acquisition) 200 Hz taajuudella 50 Hz alipäästösuotimella. Ensimmäinen mittaus suoritettiin automatisoidusti siten, että mittaus käynnistyi, kun yksi siirtymäantureista resistööri tietynsuuruisen siirtymän arvon. Automatisoitu mittaus oli käynnissä

24 tuntia ja sen aikana saatiin tallennettua yhteensä 14 mittauspisteen yli ajanutta junaa. Toinen mittaus suoritettiin jatkuvana 24 tunnin kestoisena mittauksena 0,02 Hz taajuudella. Toisen mittauksen aikana kiskoon kiinnitettiin lämpötila-anturi. Toisen mittauksen tarkoituksena oli tutkia kiskon lämpölaajenemisen aiheuttamia poikittaissuuntaisia voimia raideruuveissa. (Dick et al. 2007.)



Kuva 37 FEM analyysi ruuviin kohdistuvista kuormista (Dick et al. 2007).

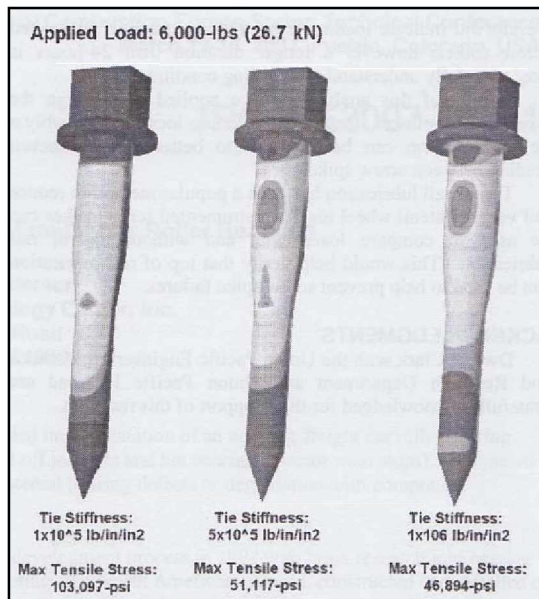
Tutkimustulokset osoittivat, että poikittaiset pyöräkuormat eivät jakaudu tasaisesti kiinnityksessä olevien neljän raideruuvien kesken. Kiskon ulkopuolella oleva ruuvi nro 2 kantoi valtaosan kaikesta kuormasta, kun taas vastakkaisella puolella oleva ruuvi nro 4 ei kantanut käytännössä lainkaan kuormaa.



Kuva 38 Pyöräkuorman jakaantuminen neljän ruuvien kesken (Dick et al. 2007).

Testin aikana mitattu yhteen ruuvien kohdistuva maksimikuorma oli 65,8 kN. Ruuvi nro 2 kantoi keskimäärin 2,5 kertaa niin paljon kuormaa kuin muut samassa aluslevyssä kiinni olevat ruuvit keskimäärin. Siirtymämittausten tulokset osoittivat, että raideruuvien liike oli hyvin epäsäännöllistä junan ylityksen aikana. (Dick et al. 2007.)

Kenttämittausten jälkeen raideruuvien väsymisjännityksiä mallinnettiin elementtimenetelmällä. Mallinnuksen tulokset osoittivat, että mitä korkeampi jäykkyys ruuvien kiinnityksellä pölkkyssä on, sitä ylemmäksi maksimijännitysten keskittymä siirtyy (Kuva 39). Tämä siis osoittaa, että jäykempi kiinnitys tukisi ruuvia paremmin sen yläpäästä ja rajoittaisi jännityksiä havaitussa katkeamiskohdassa. (Dick et al. 2007.)



Kuva 39

Ruuvien kiinnityksen jäykkyyden vaikutus ruuvien maksimivetojännitykseen ja jännityskeskittymään (Dick et al. 2007).

5 Kokeellinen tutkimus raideruuveihin kohdistuvista voimista

5.1 Laboratoriotutkimus

5.1.1 Tutkimuksen tavoite ja tutkimusmenetelmät

Laboratoriotutkimuksen tavoitteena oli selvittää, mitä katkenneiden ruuvien murtopinnat kertovat ruuvien katkeamistavasta ja -nopeudesta. Erityisesti haluttiin selvittää, onko murtopinnoissa nähtävissä väsymismurtuman merkkejä. Raideruuvien murtopinnat puhdistettiin laboratoriossa ja murtopintoja valokuvattiin suurentavalla makrokameralla. Murtopintojen ominaisuuksia tutkittiin valokuvista silmämääräisesti.

Laboratoriotutkimuksissa testattiin lisäksi kenttätutkimuksissa käytettyjen venymäliuskojen toimivuutta raideruuvissa. Betonipölkkyssä ollutta venymäliuskalla instrumentoitua raideruuvia koekuormitettiin ja tuloksena saatiin jokaiselle venymäliuskalle oma voiman ja muodonmuutoksen suhdetta kuvaava käyrä.

5.1.2 Ruuveista tehdyt havainnot

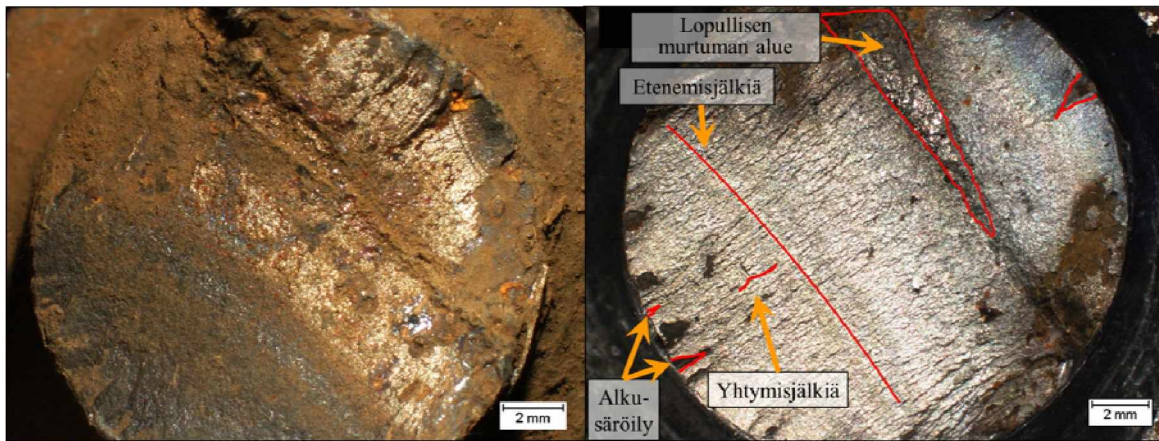
Tampereen ratapihalta kerättyjen katkenneiden ruuvien valmistusvuodet vaihtelivat vuodesta 1992 vuoteen 2001. Valtaosa tutkituista katkenneista ruuveista oli kuitenkin vuoden 2001 valmistuserästä. Kaikki tutkitut vaurioituneet ruuvit olivat katkenneet ruuvin kannasta päin katsottuna toisen tai kolmannen kierteen kohdalta. Kuvassa 40 on havainnollistettu ehjä ja katkennut ruuvi, pölkyn sisään valettava muoviholkki sekä ruuvin kannan ja aluslevyn väliin jäävä jousirengas.



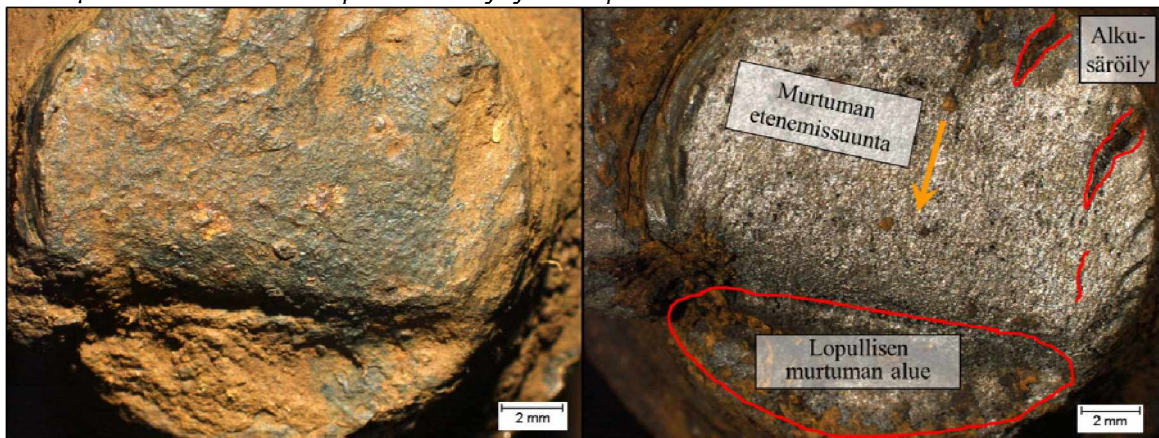
Kuva 40 Katkennut ja ehjä ruuvi, ruuvin holkki ja jousirengas.

Murtopinnat

Viisi katkennutta raideruuvia valittiin lähempään tarkasteluun. Näiden ruuvien murtopinnat valokuvattiin makrokameralla koneenrakennuksen materiaalitekniikan laboratoriossa ennen ja jälkeen puhdistuksen. Useimmista murtopinnoista voitiin jo puhdistamattominakin havaita paljaalla silmällä selkeitä väsymismurtuman etenemisjälkiä, vaikka ruuvit olivat todella ruosteisia ennen puhdistusta. Kuvassa 41 on esitetty ensimmäisenä kuvatun ruuvin yläosan murtopinta ennen ja jälkeen puhdistuksen. Kuvasta voidaan selvästi havaita väsymismurtuman jäljet. Lopullisen murtuma-alueen sijainti ruuvin keskellä kertoo, että ruuviin on kohdistunut taivuttavaa kuormitusta kahdelta suunnalta. Kuvassa 42 on esitetty järjestyksessä toisena kuvatun ruuvin yläosan murtopinta. Lopullisen murtuma-alueen sijainti murtopinnan reunassa kertoo, että ruuviin on kohdistunut taivuttavaa kuormitusta yhdeltä suunnalta. Liitteessä 2 on esitetty kolmen muun kuvatun ruuvin murtopinnat. Kuvattujen raideruuvien sijaintipaikoista vaihteessa ennen katkeamista ei ole tarkempia tietoja.



Kuva 41 Ruuvin murtopinta ennen ja jälkeen puhdistuksen.



Kuva 42 Ruuvin murtopinta ennen ja jälkeen puhdistuksen.

Lujuusluokka

Ruuvien valmistaja Inhan Tehtaat Oy teetti helmikuussa 2012 raideruuveille vetokokeita Metlab Oy:n laboratoriossa Tampereella. Testatut raideruuvit olivat vuoden 2002 valmistuserästä. Vetokokeen tulokset on esitetty taulukossa 4. Liitteessä 3 esitetyn testaussesteen mukaan vetokoe on toteutettu standardin SFS-EN 10002-1 (Metallien vetokoe. Osa 1: Vetokoe huoneenlämpötilassa) mukaisesti. Tämä standardi on kumottu ja korvattu uudella päivitetyllä standardilla (SFS-EN ISO 6892-1) vuonna 2009, mutta kokeentekoajankohtana uusi standardi ei vielä kuulunut Metlab Oy:n akkreditoituun pätevyysalueeseen ja tämän vuoksi kokeessa on käytetty vanhaa standardia. SFS-EN 10002-1 ja SFS-EN ISO 6892-1 menetelmä B ovat teknisesti toisiaan vastaavia ja eroavat toisistaan jonkin verran ainoastaan koesauvojen valmistustoleranssien kohdalla. (Nieminen, 2012.)

Taulukko 4 – Metlabin tekemien vetokokeiden tulokset

Vetokoe R170-P ruuvista valmistetuille koesauvoille 10.2.2012				
	Ylempi myötöraja	Murtolujuus	Murtovenymä	Kurouma
	R _{eH} [MPa]	R _m [MPa]	A ₅ [%]	Z [%]
Koesauva 1	307	479	32.0	67
Koesauva 2	317	477	33.0	65
Koesauva 3	311	476	32.5	67

Kaavojen 11 ja 12 mukaisesti laskettuna kaikkien tutkittujen koekappaleiden lujuusluokaksi saadaan 4.6. Testatut ruuvit eivät siis täytä luvussa 4.1 esitettyjen ohjeiden vaatimusta lujuusluokasta 5.6.

Yllä esitettyjen vetokokeiden tulosten perusteella oli syytä epäillä, että kenttäkoetta varten VR:n Pieksämäen vaihdhallilta hankittujen raideruuvien lujuusluokka saattaisi myös poiketa vaatimuksista. Asian selvittämiseksi päätettiin yhdelle vuoden 2011 valmistuserän ruuville tehdä vetokoe rakennetekniikan koehallissa. Vetokoe toteutettiin standardin SFS-EN 10002-1 mukaisesti, jotta tulos olisi vertailukelpoinen Metlab Oy:n tekemän kokeen kanssa. Kokonaisesta R170-P-raideruuvista sorvattiin ensin standardin mukainen vetosauva ja tämän vetosauvan lujuus testattiin vetokokeessa, jonka tulokset on esitetty taulukossa 5. Vetokokeen täydellinen testausseste on esitetty liitteessä 4.

Taulukko 5 Rakennetekniikan koehallissa tehdyn vetokokeen tulokset

Vetokoe R170-P ruuvista valmistetulle koesauvalle 16.11.2012				
	Ylempi myötöraja	Murtolujuus	Murtovenymä	Kurouma
	R _{eH} [MPa]	R _m [MPa]	A ₅ [%]	Z [%]
Koesauva 1	445	622	17.6	46

Kaavojen 9 ja 10 mukaisesti laskettuna testatun koekappaleen lujuusluokaksi saadaan 6.6, mikä täyttää luvussa 4.1 esitettyjen ohjeiden raideruuvien lujuusluokalle asetetut vaatimukset.

5.1.3 Venymäliuskalla instrumentoitujen raideruuvien koekuormitus

Venymäliuskamittauksen periaate

Venymäliuskamittaus perustuu Hooken lakiin:

$$\sigma = E\varepsilon, \quad \text{missä} \quad (13)$$

σ on kappaleessa vallitseva jännitys,

ε on suhteellinen venymä ja

E on materiaalin kimmomoduuli eli elastisuuskertoain.

Kimmomoduulin tarkka arvo vaihtelee materiaalin rakennekoostumuksen mukaan, joten tarkan jännityksen laskeminen venymän perusteella edellyttää todellisen kimmomoduulin arvon tuntemista. Rakenneteräkselle voidaan kimmomoduulin likiarvona käyttää 210 GPa, kun lämpötila on 0–100 °C.

Venymäliuskamittauksessa oletetaan, että kuormituksen alaisen materiaalin venymä siirtyy materiaalin pintaan kiinnitettyyn venymäliuskaan ilman häviötä. Tämä edellyttää kuitenkin, että venymäliuska on erittäin hyvässä kosketuksessa materiaalin pintaan. Kun kappale venyy, sen pintaan kiinnitetyn venymäliuskan vastus muuttuu. Vastuksen suhteellinen muutos on verrannollinen suhteelliseen venymään verrannollisuuskertoimella k kaavan 12 mukaisesti. Kerrointa k nimitetään liuskavakioksi ja sen arvo on venymäliuskatyypistä ja valmistuserästä riippuvainen.

$$\frac{\Delta R}{R} = k \varepsilon, \quad \text{missä} \quad (14)$$

R on liuskan ilmoitettu resistanssi

ΔR on mitattu resistanssin muutos ja

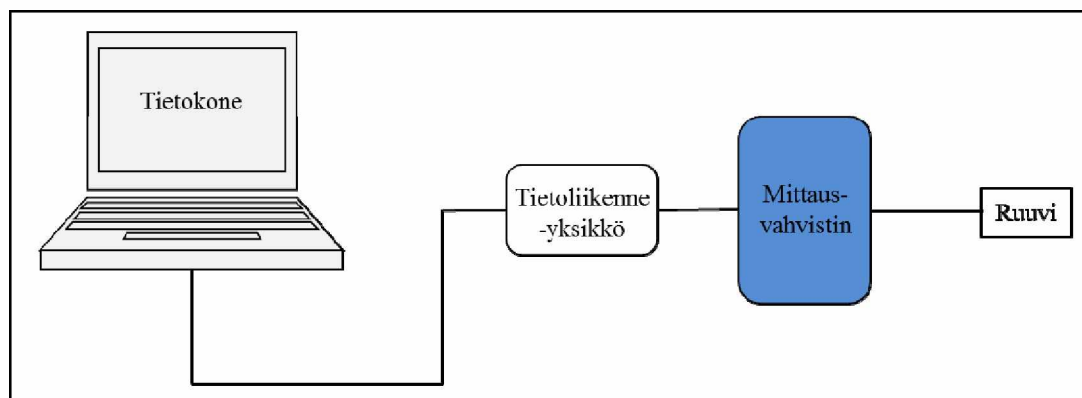
ε on suhteellinen venymä.

Mittauslaitteet ja mittausjärjestely

Raideruuvien venymän mittaukseen käytettiin Kyowan KFG-3-120-C20-11 -venymäliuskaa, jonka ominaisuudet on esitetty taulukossa 6. KFG-sarjan venymäliuskat on kehitetty erityisesti pulttien ja ruuvien pituussuuntaisen jännityksen mittaamiseen. Koekuormituksen aikana venymäliuskat kytkettiin yksi kerrallaan mittausvahvistimeen ja mittausvahvistin kytkettiin tietoliikennesikön kautta tietokoneeseen kuvan 43 mukaisesti. Mittausnopeus oli 100 Hz eli laitteisto tallensi venymän arvon aina 10 ms välein. Käytetyn mittauslaitteiston tarkemmat tiedot on esitetty liitteessä 5.

Taulukko 6 KFG-3-120-C20-11 venymäliuskan ominaisuudet (Kyowa 2012).

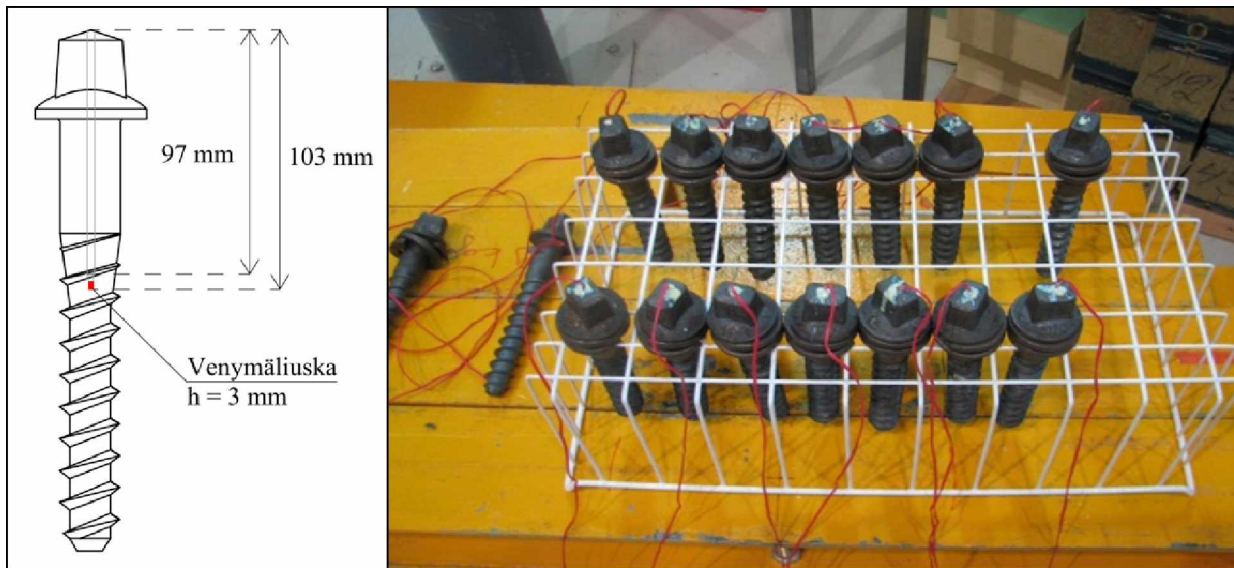
KFG-3-120-C20-11	
Tukilieriön halkaisija	1,9 mm
Tukilieriön korkeus	11,5 mm
Liuskan korkeus	3 mm
Resistanssi	120 Ω
Liuskavakio, k	1,9



Kuva 43 Koekuormituksen mittausjärjestely

Koska käytössä olevalla mittauslaitteistolla oli mahdollista mitata yhtäaikaaisesti enintään 20 ruuvien venymää, instrumentoituja ruuveja valmistettiin yhteensä 20. Ruuvit numeroitiin yhdestä kahteenkymmeneen ja kalibroitiin numerojärjestyksessä. Venymäliuskaa varten raideruuveihin porattiin pituussuuntainen reikä. Reikää porattiin ensin halkaisijaltaan 3 mm paksuisella terällä n. 97 mm syvyyteen ja sen jälkeen porausta jatkettiin 2 mm paksuisella terällä niin, että reikä ulottui n. 107 mm syvyyteen eli suunnilleen toisen ja kolmannen kierteen puoliväliin.

Porauksen jälkeen ruuvien reiät puhdistettiin ensin paineilmalla ja sitten ruiskuttamalla reikään asetonia. Asetonilla puhdistamista jatkettiin, kunnes reiästä valuva neste oli täysin kirkasta. Puhdistamisen jälkeen ruuvien annettiin kuivua yön yli ennen liimaamista. Venymäliuskan kiinnittämistä varten reikään levitettiin liimaa käyttäen apuna muovista asetinputkea, jonka avulla pyrittiin valmistamaan liiman tasainen leviäminen myös reiän pohjalle. Liiman levityksen jälkeen venymäliuska asetettiin varovasti reiän pohjalle. Liimauksen annettiin sitten kuivua uunissa 60 °C lämpötilassa 3 tuntia. Kuvassa 44 on havainnollistettu venymäliuskan asentamista ruuvien sisälle.

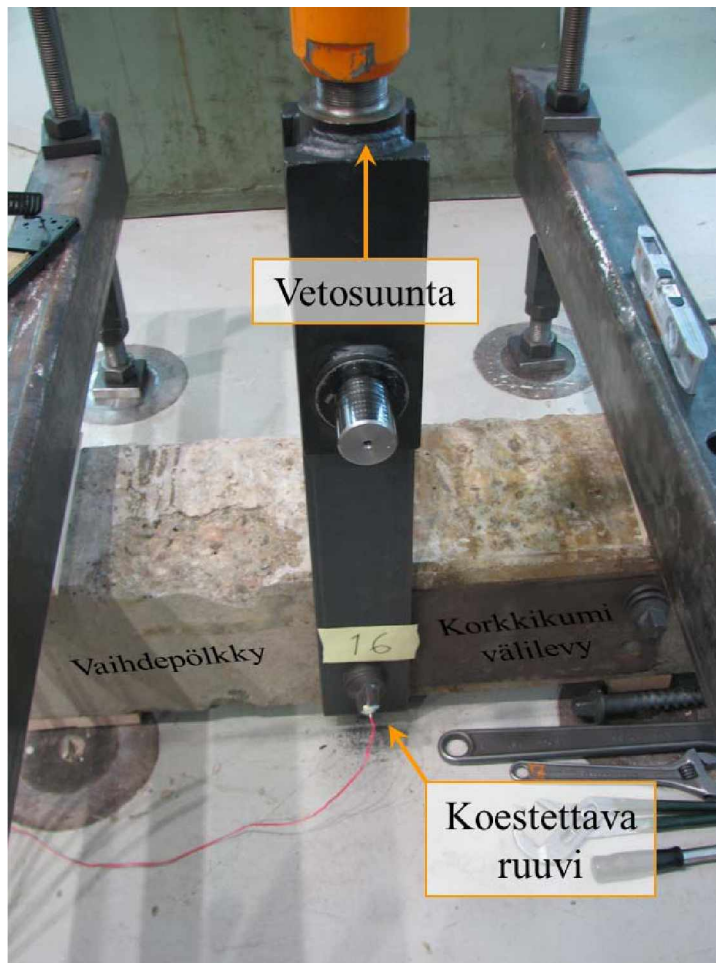


Kuva 44 Venymäliuskan asentaminen ruuviin

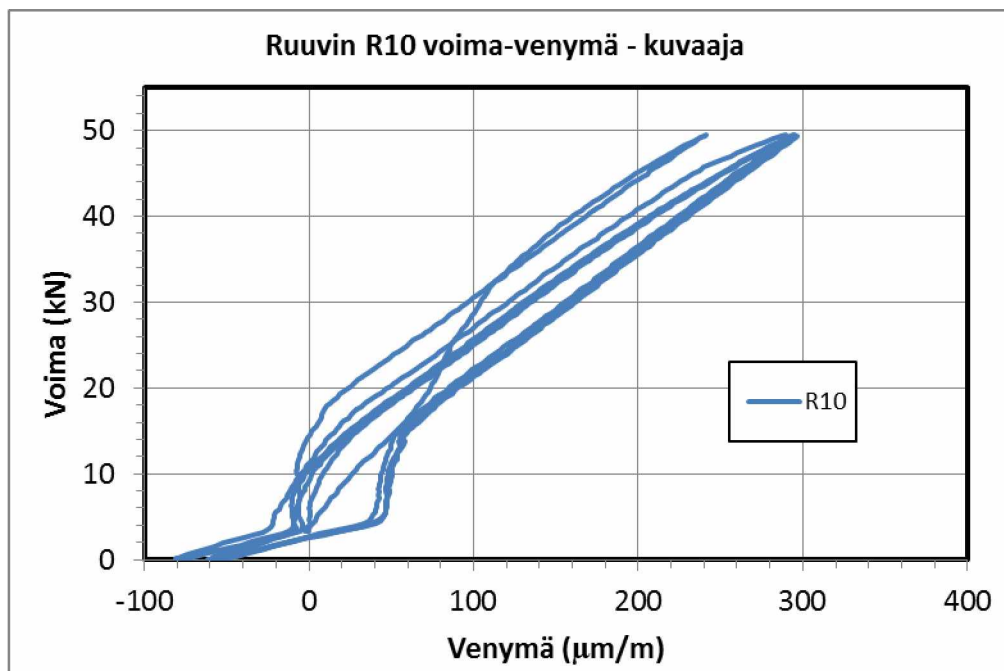
Kenttäkokeita varten venymäliuskojen toimivuutta ja liimauksen onnistumista testattiin laboratoriossa koekuormittamalla ruuveja. Ennen koekuormitusta ruuvit numeroitiin yhdestä kahteenkymmeneen ja kuormitus suoritettiin numerojärjestyksessä. Koekuormitusjärjestely on esitetty kuvassa 45. Ruuvit asennettiin yksi kerrallaan kyljellään olevaan betoniseen vaihdepölkkyyn ja kiristettiin käsin momenttiavaimella 250 Nm momenttiin. Kiskonkiinnityksen ripa-aluslevy korvattiin vastaavan paksuisella metallilevyllä, jota pystyttiin vetämään koneellisesti kohtisuoraan ruuviin nähden. Vetävää voimaa kasvatettiin nolasta enintään 50 kN:iin ja laskettiin sitten taas nolaa. Tällaisia kuormitusyklejä toistettiin jokaiselle ruuville yhteensä 5 kertaa.

Kuvassa 46 on esitetty koekuormituksen tuloksena saatu voima-venymä-kuvaaja ruuville R10. Kahdessa testatussa ruuvissa koekuormitus ei aiheuttanut venymäliuskaan minkäänlaisia muodonmuutoksia ilmeisesti liimauksen epäonnistumisen takia, ja nämä ruuvit hylättiin kokonaan tutkimuksesta. Muitten testattujen ruuvien koekuormituksen tuloksena saadut voima-venymä-kuvaajat on esitetty liitteessä 6.

Venymäliuskojen käyttäytymisessä oli havaittavissa selkeää hajontaa, mutta pääosin ruuvien venymä kasvoi lineaarisesti kuormituksen kasvaessa. Joissakin ruuveissa venymäliuskat käyttäytyivät kuitenkin täysin päinvastaisesti kuin odotettiin ja ruuvien venymä pieneni kuormituksen kasvaessa. Tämä ilmiö saattaa johtua siitä, että venymäliuska ei kata täysin tukilieriön vaipan alaa, vaan liuskaan jää ns. sokea kohta. Liuska toimii kun, siihen kohdistuu puhdasta vetoa, mutta taivutuksen alaisena liuska käyttäytyy eri tavoin sen mukaan, mihin kohtaan liuskan sokea kohta asettuu. Venymäliuskamittauksen toimivuutta tässä tutkimuksessa käsitellään tarkemmin tulosten yhteydessä luvussa 6.3.



Kuva 45 Koekuormitusjärjestely



Kuva 46 Koekuormituksen tuloksena saatu voima-venymä-kuvaaja.

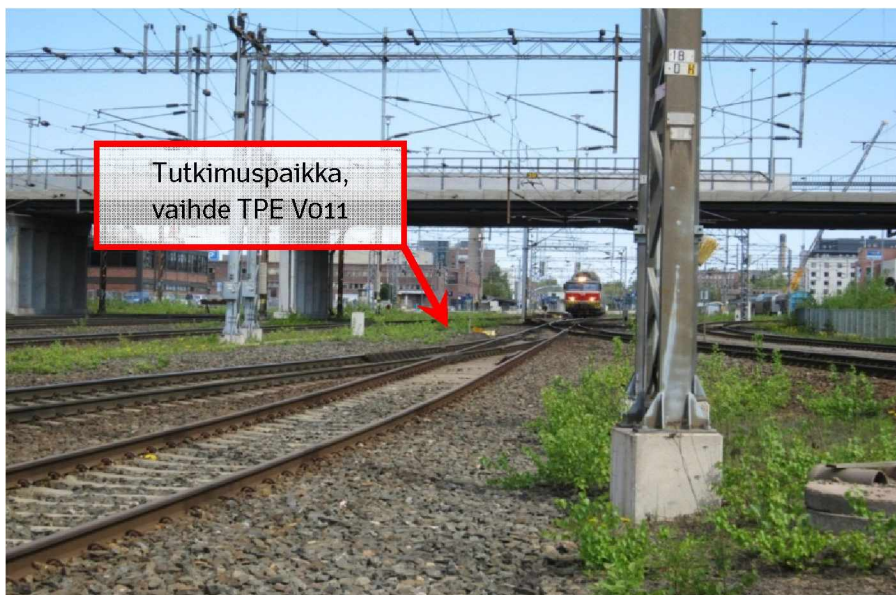
5.2 Kenttätutkimus

5.2.1 Tutkimuksen tavoitteet, mittauspaikka ja alkuhavainnot

Kenttätutkimuksen tavoitteena oli selvittää, onko kalustosta raideruuveihin kohdistuvalla kuormituksella eroja eri kalustotyyppien välillä ja onko raideruuvien katkeaminen seurausta jonkin tietyn kalustotyyppin aiheuttamasta kuormituksesta. Erityisen mielenkiinnon kohteena oli kuormien vertailu Pendolino-junan ja muun kaluston välillä, sillä Tampereen ratapihan kunnossapitourakoitsijan mukaan raideruuvien katkeamisoongelma oli ilmennyt ensimmäisiä kertoja suunnilleen samoihin aikoihin kuin Pendolino-juna aloitti liikennöinnin Tampereella. Lisäksi tavoitteena oli selvittää, miten kuormitus jakautuu kiinnityksessä olevan neljän ruuvin kesken.

Mittaukset suoritettiin 21.–22. elokuuta 2012 Tampereen henkilöratapihalla, joka on vilkkaasti liikennöity rautatieliikenteen risteysasema. Tampereella risteävät Seinäjoen, Porin, Jyväskylän ja Riihimäen radat. Tampereen ratapihan läpi kulkee vilkkaimpien arkipäivien aikana 79 henkilöliikenteen junaa. (VR 2012.) Lisäksi liikennepaikan läpi kulkee 40–50 tavarajunaa vuorokaudessa (Pirkanmaan liitto, 2011). Ratapihalla sallittu suurin akselipaino on 250 kN ja linjalla suurin sallittu nopeus 40 km/h. Koko ratapiha on 60E1 -kiskoprofiilin betonipölkkyistä jatkuvakiskoraidetta. (VR 2012.)

Tampereen ratapihalla useiden vuosien aikana toistuvasti havaitut raideruuvivauriot rajoittuvat kahdelle vaihekujalle, joilla sijaitsee yhteensä 11 lyhyttä vaihdetta. Näiden vaihteiden sijainti on esitetty tarkemmin Tampereen liikennepaikan raiteistokaviossa liitteessä 7. Kyseiset vaihekujat johtavat pääraiteilta laituriraiteille 4 ja 5. Näiden vaihekujien kautta kulkevat pääasiassa Jyväskylään päin matkalla olevat tai Jyväskylän suunnasta saapuvat junat.

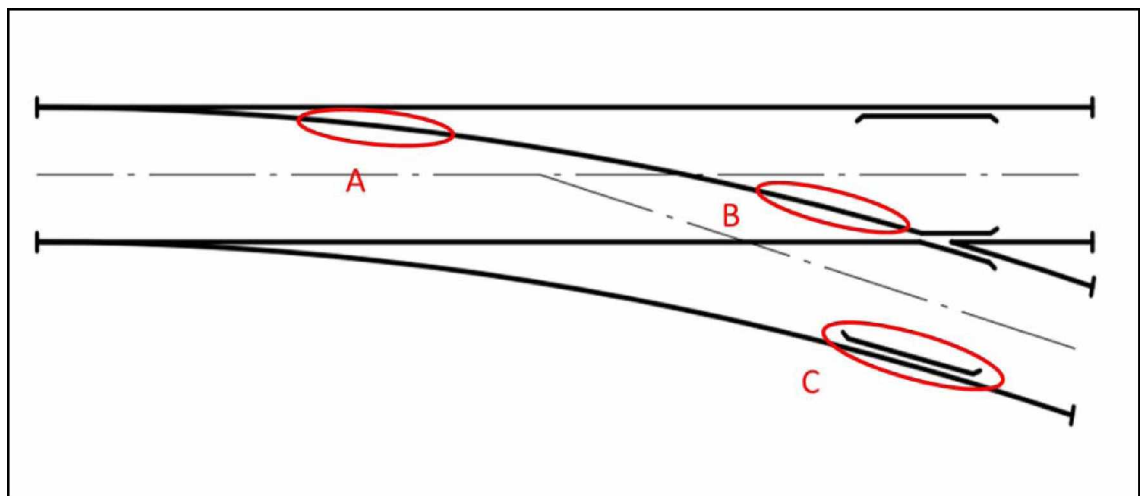


Kuva 47 Tutkimuspaikka, vaihde TPE V011 Tampereen ratapihalla (Eleonoora Salminen 2012).

Näistä yhdestätoista vaihteesta yksi, vaihte TPE Vo11 (Kuva 47), valittiin lähempään tarkasteluun. Vaihteen valintaan vaikutti erityisesti sen sijainti ratapihan reunalla sekä havaittujen vaurioiden määrä. Vaihteen lähelle oli mahdollista päästä ajoneuvolla ja ratapihan reunalla mittaukset oli mahdollista suorittaa ylittämättä tarpeettomasti muita vilkkaasti liikennöityjä raiteita.

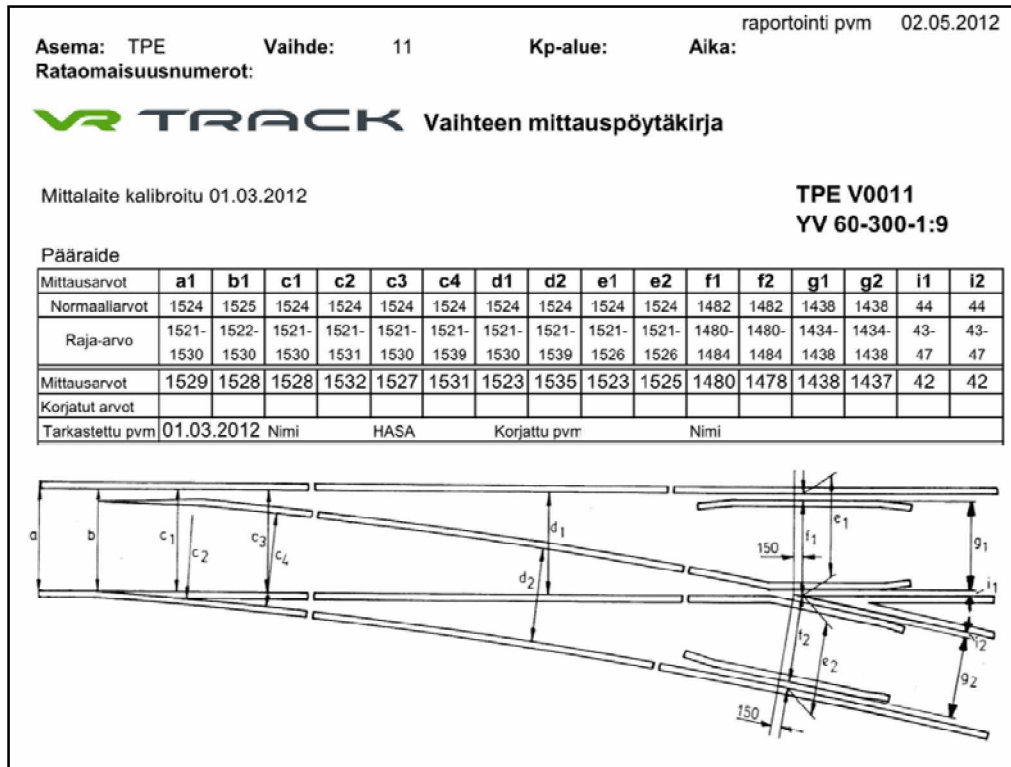
Vaihteessa TPE Vo11 sattui keväällä 2012 vaaratilanne, kun vaihteen poikkeavalle raiteelle ajaneen Pendolino-junan ensimmäisen vaunun uloimmat pyörät osuivat risteuksen kärkeen ja suistuminen oli lähellä. Poikkeavan raiteen vastakiskon ja tukikiskon 36 ruuvista lähes puolet oli katkennut vuoden aikana, mistä syystä vastakisko pääsi liikkumaan junakuorman alla ja risteuksen ohjauksettoman osuuden kohdalla junan pyörillä ei ollut riittävää ohjausta.

Kahden vaihteessa TPE Vo11 tehdyn katselmuksen perusteella raideruuveja havaittiin katkenneen erityisesti ulkokaaren puoleisen kielikiskon kannan ympäristöstä (Kuva 48, kohta A), poikkeavan raiteen vastakiskosovituksesta (Kuva 48, kohta B) sekä ulkokaaren puoleisesta kiskon ympäristöstä lähellä risteystä (Kuva 48, kohta C). Suurin vauriokeskittymä tässä vaihteessa sijaitsi vastakiskosovituksessa, jossa tukikiskon ja vastakiskopukkien raideruuveista lähes puolet oli katkennut edellisen vuoden aikana. Kaikki vaihteet, joissa Tampereen ratapihalla on havaittu raideruuvien katkeamista, ovat vilkkaasti liikennöityjä ja ne tarkastetaan neljä kertaa vuodessa.



Kuva 48 Vauriokeskittymät vaihteessa TPE Vo11.

Maastokäyntien aikana todettiin, että katkenneiden raideruuvien havainnointi harjaantumattomalla silmällä on vaikeaa. Joissakin tapauksissa ruuvien jousirenkaiden asennosta voitiin huomata ruuvien kiristyksen olevan löystynyt katkeamisen takia. Harvassa katkenneessa ruuvissa oli kuitenkin havaittavissa päältäpäin minkäänlaisia näkyviä tekijöitä, josta olisi voinut päätellä, että ruuvi on pölkyn sisällä katkennut. Toinen käytössä oleva keino selvittää, onko ruuvi mahdollisesti katkennut, on kopauttaa ruuvien kantaa vasaralla ja kuulostella ruuvista syntyvää ääntä. Kokonaan katkenneesta ruuvista syntyy hiukan kimeämpi kilahdus kuin ehjästä. Tämäkin keino vaatii kuitenkin toteuttajaltaan harjaantunutta kuuloaistia. Ainoa täysin varma keino selvittää onko ruuvi katkennut, on irrottaa se kokonaan. Ruuveja irrotettaessa havaittiin, että osa ruuveista katkesi lopullisesti vasta pölkystä irrottamisen yhteydessä ja osassa murtuma ei ollut vielä edennyt katkeamiseen asti.



Kuva 49 Vaihteen V0011 mittauspöytäkirja 1.3.2012.

Kuvassa 49 on esitetty vaihteen TPE V011 mittauspöytäkirja maaliskuulta 2012. Kuvassa ilmoitetut raja-arvot ovat kuvassa X esitettyjen pääraiteen kunnossapitotoleranssien mukaiset. Vaihteen raideleveyden mitatuista arvoista a, c, ja d nähdään, että erityisesti vaihteen poikkeavan raiteen raideleveys on levinnyt mitoitusarvosta 1524 mm. Poikkeavan raiteen kielen kantojen kohdalta otettu c1-mitta ylittää kunnossapitotoleranssin ylärajan 1 mm:llä. Lisäksi vastakiskon ja risteyksen kärjen välinen f2-mitta alittaa kunnossapitotoleranssin alarajan 2 mm:llä, eli vastakisko on kuormituksen alla siirtynyt kauemmaksi tukikiskosta. Risteyksen ja siipikiskon välinen etäisyys, i1- ja i2-mitat alittavat sekä poikkeavalla että suoralla raiteella kunnossapitotoleranssin alarajan 43 mm akuuttiarvon ollessa 41 mm.

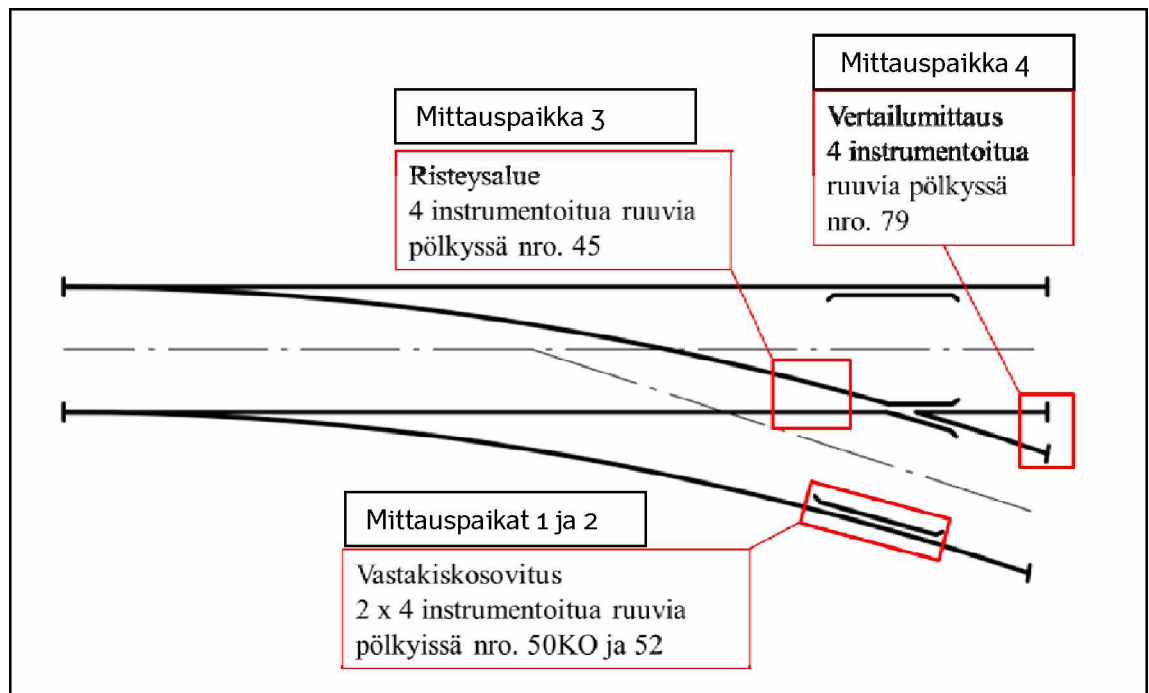
5.2.2 Tutkimusmenetelmät ja mittausmenettely

Yksittäiseen raideruuviin kohdistuvaa kuormitusta mitattiin ruuvien sisään liimatun venymäliuskan avulla. Lisäksi vastakiskon ja sekä yhden instrumentoidun ruuvien poikkaisuuksista siirtymää junakuorman alla havainnoitiin siirtymäantureilla. Vaihteen vastakiskosovitus kuvattiin suurnopeuskameralla poikkeavan raiteen vastakiskon tukikiskon puolella, pölkkyssä 50KO, jotta tiedettiin tapahtuuko kiskonkiinnityksissä silmin havaittavaa liikettä junakuorman alla. Junien nopeutta vaihteessa mitattiin autoon kytkettävällä nopeustutkalla.

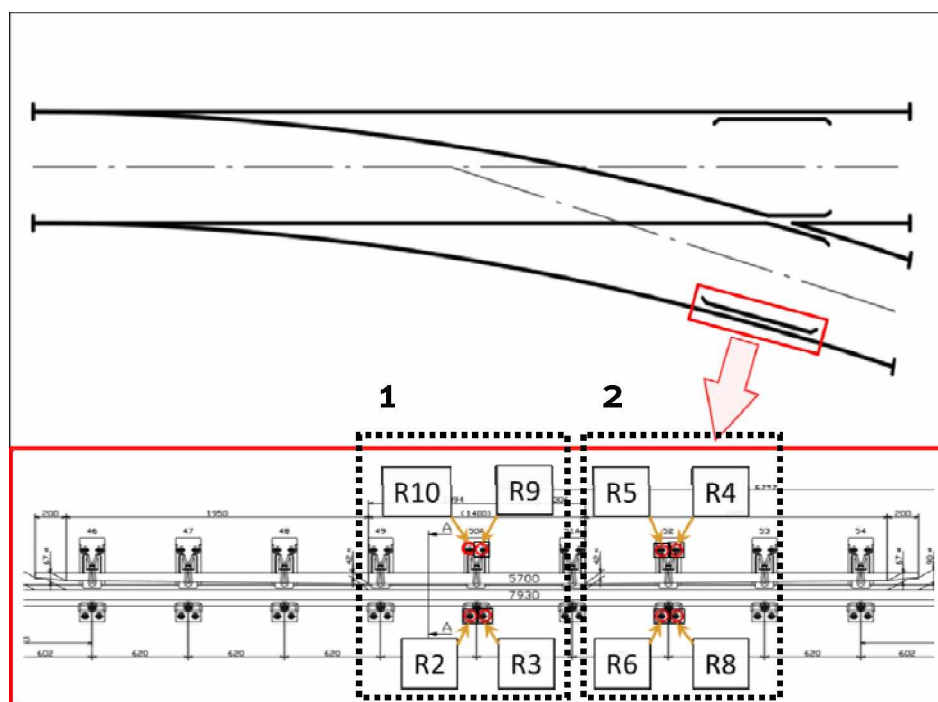
Venymämittaus

Venymäliuska instrumentoituja ruuveja asennettiin vaihteeseen yhteensä 16. Instrumentoitujen ruuvien sijainti vaihteessa on esitetty kuvassa 50. Pölkkyjen numerointi on liitteessä 9 esitetyn YV60-300-1:9-O vaihteen linjakuvion piirustuksen 4022_165-001_D mukainen. Ruuvit sijoitettiin paikoille, joista ruuveja tiedettiin katkenneen edellisen vuoden aikana. Instrumentoitujen ruuvien yksityiskohtainen sijoittelu vaihteessa on esitetty kuvissa 51, 52 ja 53. Kuvissa punaisella ympyröidyt

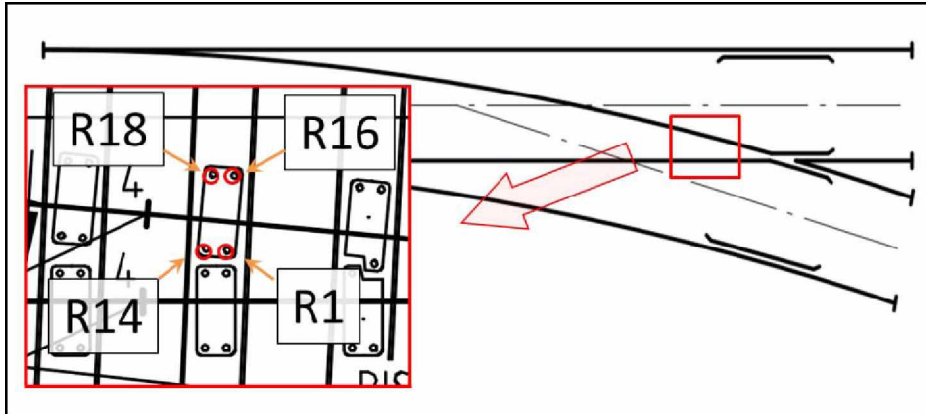
ruuvit korvattiin venymäluiskalla instrumentoiduilla ruuveilla. Poikkeavan raiteen vastakiskosovituksessa asennettiin kahdeksan ruuvia pölkkyihin nro 50KO ja nro 52, neljä kumpaankin. Risteysalueella instrumentoidut ruuvit asennettiin pölkkyyn nro 45, poikkeavan raiteen ulkokaaren puoleisiin takajatkoksiin, aluslevyn kaikkiin neljään kiinnityskohtaan. Vertailumittauspiste oli alun perin tarkoitus sijoittaa suoran raiteen takajatkoksiin, mutta koska suoran raiteen läpi kulkeva liikenne oli vaihteella hyvin vähäistä, vertailumittauspiste päädyttiin siirtämään poikkeavan raiteen ulkokaaren puoleiseen takajatkokseen, vaihteen viimeiselle pölkylle nro 79.



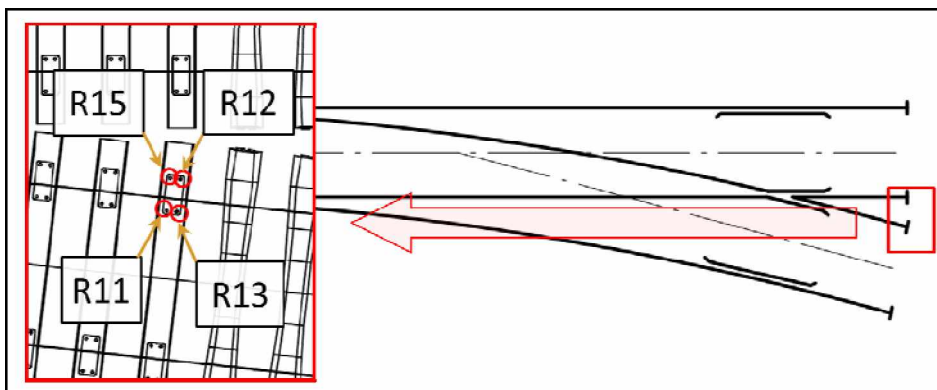
Kuva 50 Venymämittauspaikkojen sijainti vaihteella.



Kuva 51 Mittauspaikat 1 ja 2 vastakiskosovituksessa.

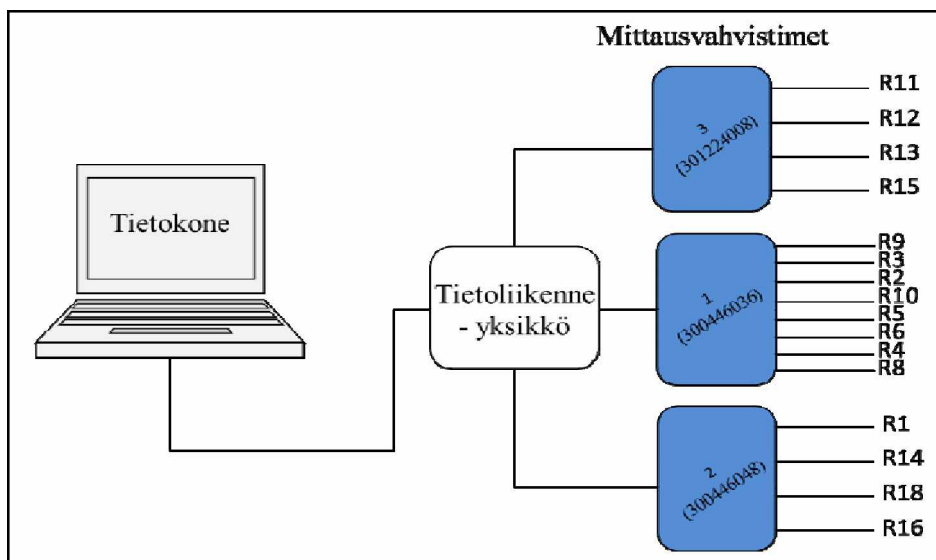


Kuva 52 Mittauspaikka 3 risteysalueella.



Kuva 53 Mittauspaikka 4 eli vertailumittauspaikka poikkeavan raiteen takajatkoksessa.

Venymäliuskoilla instrumentoidut ruuvit kytkettiin kuvan 54 mukaisesti kolmeen erilliseen mittausvahvistimeen ja mittausvahvistimet kytkettiin tietoliikenneyksikön kautta tietokoneeseen. Mittausvahvistimeen nro 1 kytkettiin 8 ruuvia ja vahvistimeen nro 2 ja nro 3 neljä ruuvia. Taulukossa 7 on esitetty tarkemmin instrumentoitujen ruuvien kytkentä mittalaitteistoon. Mittausnopeus oli sama kuin ruuvien koekuormituskokeessa eli 100 Hz. Mittausohjelmistona käytettiin HBM catmanEasy/AP:n versiota 3.3.3.



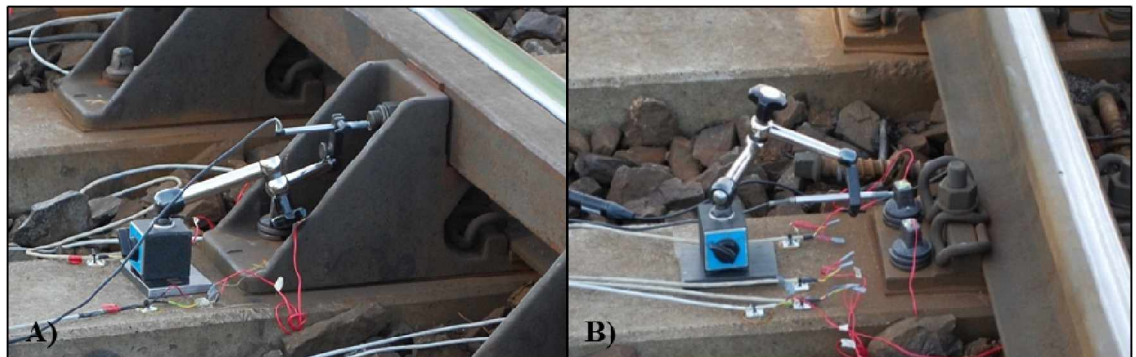
Kuva 54 Venymämittauslaitteiston kokoonpano.

Taulukko 7 Venymäliuskojen kytkentä.

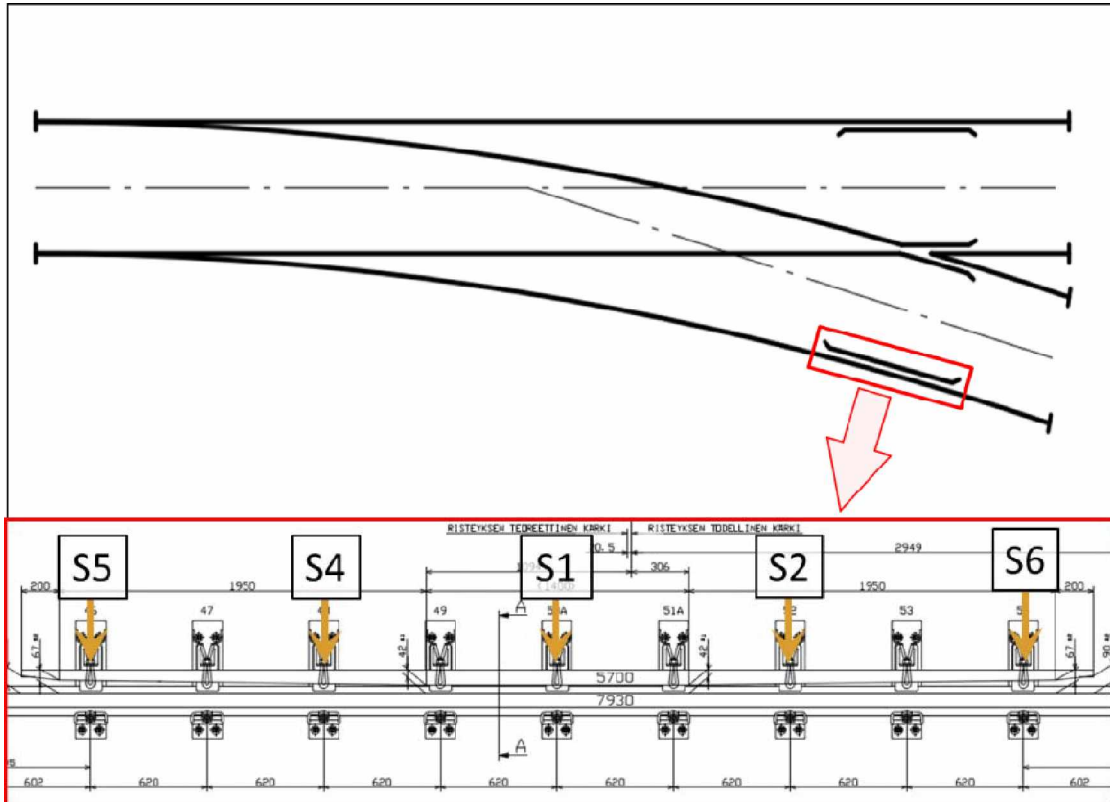
VENYMÄLIUSKOJEN KYTKENTÄ				
<i>Laite ID (Canhead-mittausvahvistin)</i>	<i>Laite nro</i>	<i>Kanava nro</i>	<i>Ruuvi nro</i>	<i>Kiinnityspiste ratapölkyn nro (mittauspaikka)</i>
300446036	1	1	R9	50Ko (1)
		2	R3	50Ko (1)
		3	R2	50Ko (1)
		4	R10	50Ko (1)
		5	R5	52 (2)
		6	R6	52 (2)
		7	R4	52 (2)
		8	R8	52 (2)
300446048	2	1	R1	45 (3)
		2	R14	45 (3)
		3	R18	45 (3)
		4	R16	45 (3)
301224008	3	1	R11	79 (4)
		2	R12	79 (4)
		3	R13	79 (4)
		4	R15	79 (4)

Siirtymämittaus

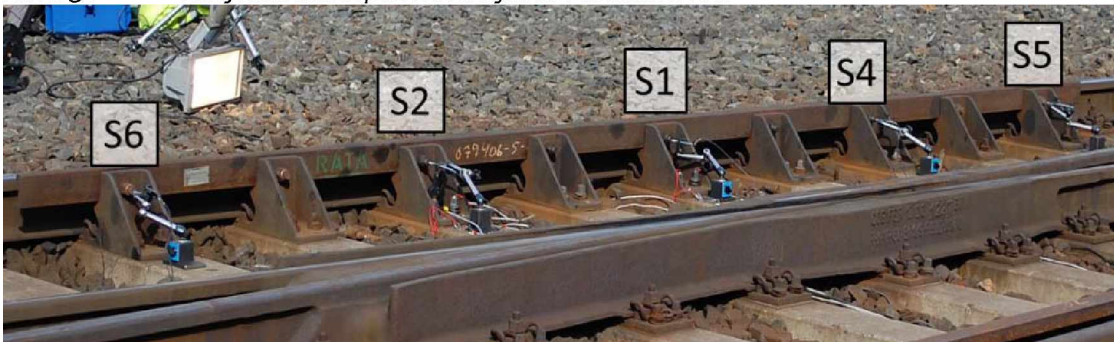
Ensimmäisenä mittauspäivänä vaihteeseen asennettiin kolme siirtymäanturia. Kaksi näistä antureista sijoitettiin mittaamaan poikkeavan raiteen vastakiskon sivusiirtymää pölkkyjen 50KO ja 52 kohdalla kuvan 55A mukaisesti niin, että anturin kärki otti kiinni vastakiskopukin ja vastakiskon kiinnitysruuviin. Yksi antureista asennettiin risteysalueelle pölkkyyn 45 mittaamaan ruuvien R16 kannan siirtymää kuvan 55B mukaisesti. Toisena mittauspäivänä poikkeavan raiteen vastakiskosovitukseen asennettiin vielä neljä siirtymäanturia lisää. Vastakiskoon asennettujen siirtymäantureiden sijainti vaihteessa on esitetty kuvissa 56 ja 57. Siirtymäantureiden numerointi vastaa niiden asennusjärjestystä.



Kuva 55 Siirtymäanturien asennus A) vastakiskoon B) ruuvien R16 kantaan.

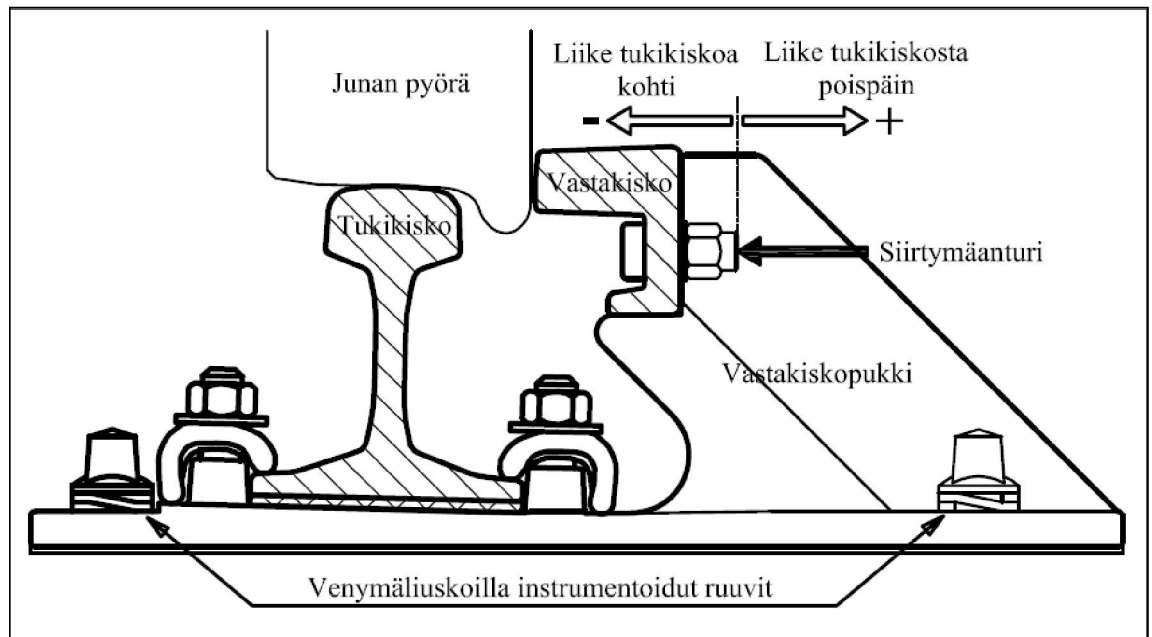


Kuva 56 Siirtymämittauspisteiden sijainti vastakiskossa.



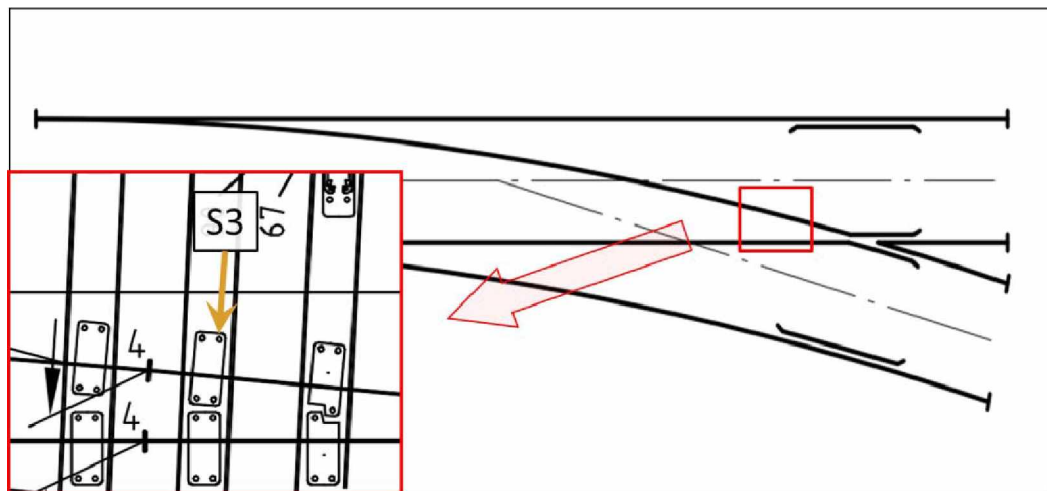
Kuva 57 Siirtymäanturit S1, S2, S4, S5 ja S6.

Kuvassa 58 on esitetty poikkileikkaus vastakiskosovituksesta, josta selviää tarkemmin yksittäisen siirtymäanturin mittauspiste vastakiskopukissa. Anturi rekisteröi vastakiskopukin liikkeen tukikiskosta poispäin positiivisena ja liikkeen tukikiskoon päin negatiivisena.

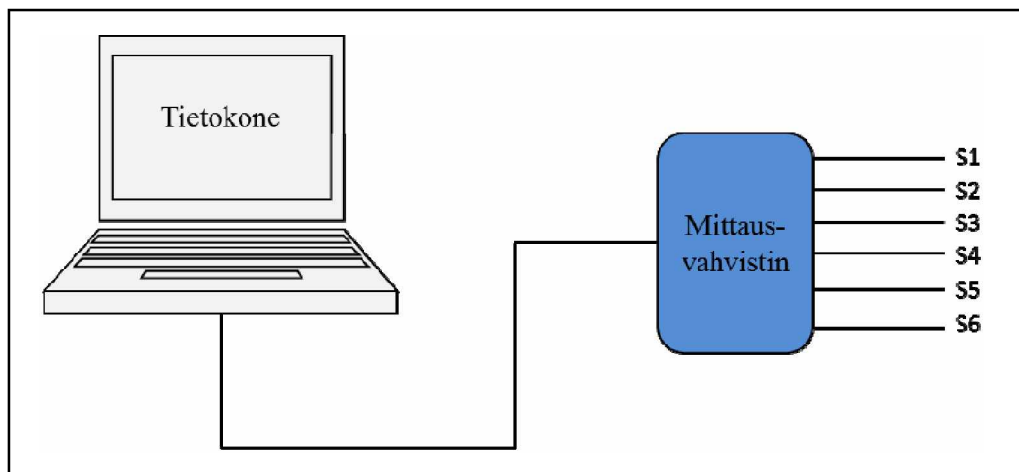


Kuva 58 Siirtymän mittausjärjestely vastakiskopukissa.

Risteysalueelle ruuvien R16 kannan siirtymä mitanseen siirtymäanturin sijainti on esitetty kuvassa 59. Kaikki käytössä olleet siirtymäanturit kytkettiin yhden mittausvahvistimen kautta suoraan tietokoneeseen kuvan 60 mukaisesti. Mittausnopeus oli 100 Hz. Mittausohjelmistona toimi sama ohjelmisto kuin venymämittauksessa, HBM catmanEasy/AP:n versio 3.3.3. Asennetuilla siirtymäantureilla pystyttiin mittaamaan enintään 3 mm suuruinen liike.



Kuva 59 Siirtymämittauspisteen S3 sijainti risteyksessä.



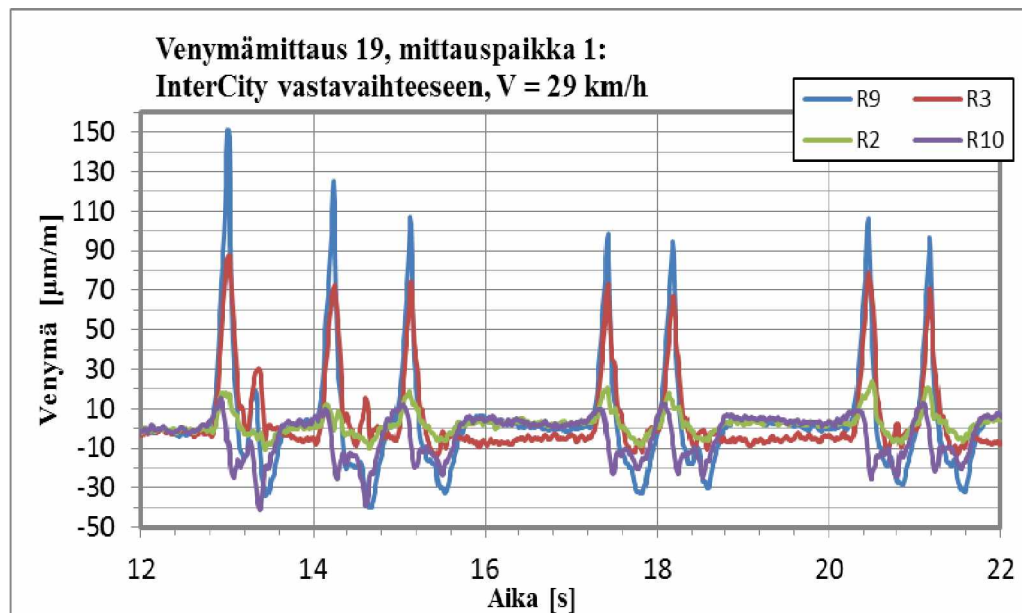
Kuva 60 Siirtymämittauslaitteiston kokoonpano.

6 Mittaustulokset ja tulosten tarkastelu

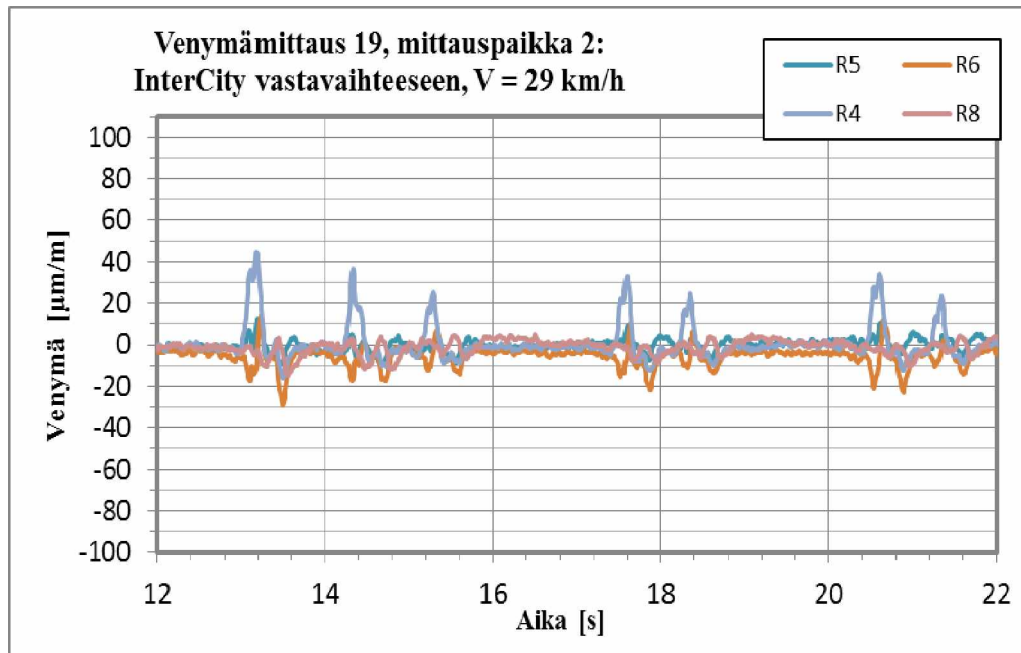
Kahden päivän mittauksen aikana saatiin rekisteröityä yhteensä 36 eri kalustoyksikön yliajao vaihteessa, joista kymmenen mitattiin ensimmäisenä päivänä ja loput 26 toisena päivänä. Ensimmäisestä yliajosta saatiin rekisteröityä vain siirtymädata ja 9. yliajosta pelkästään venymädata. Siirtymä- ja venymämittaus käynnistettiin manuaalisesti aina, kun turvamieheltä saatiin tieto, että juna on tulossa vaihteen yli. Mittaus 12 huomattiin kuitenkin käynnistää vasta, kun osa junasta oli jo ajanut vaihteen yli, koska tiedotusta vaihteen yliajosta ei tullut ollenkaan. Lisäksi mittauksessa 33 siirtymämittaus keskeytettiin epähuomiossa liian aikaisin. Mitattujen junien nopeudet vaihteen yli ajettaessa vaihtelivat 20–34 km/h välillä keskinopeuden ollessa 28 km/h. Liitteessä 8 on listattu tarkemmin kaikki mitatut junat ja vaihtotyöyksiköt sekä niiden vaunukokoonpanot, nopeudet ja suunnat. Vastakiskon suurnopeusvideossa voitiin havaita aluslevyn kumivälilevyn painuminen junakuorman alla, mutta ruuvien kannoissa tai muissa kiinnityksen osissa ei tapahtunut silmin havaittavaa liikettä.

6.1 Venymämittaus

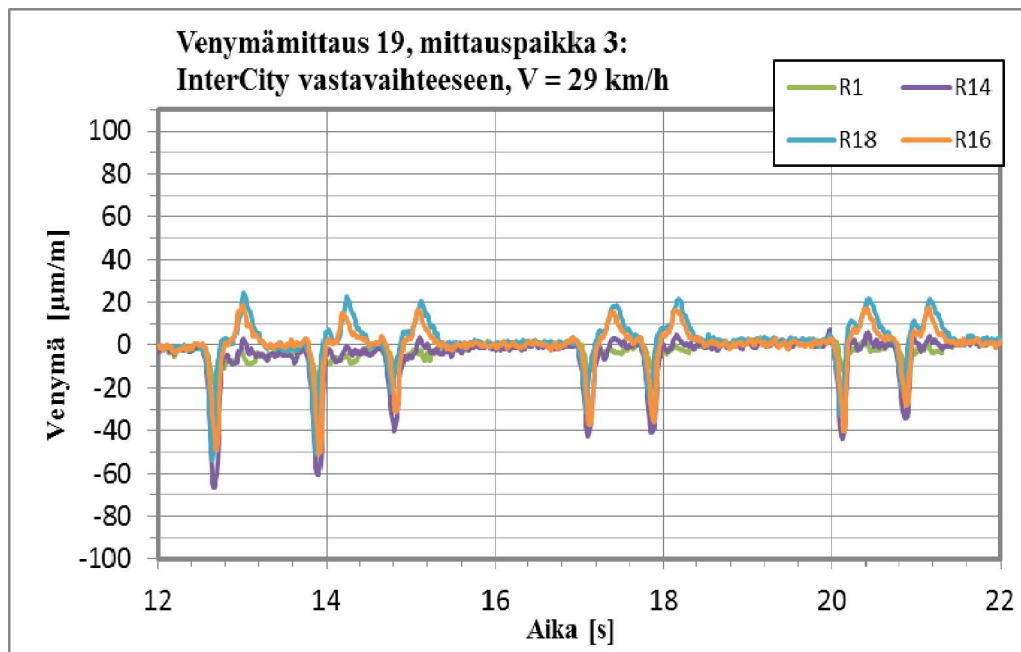
Seuraavissa kuvissa (61 – 64) on esitetty esimerkit eri mittauspaikoista kerätystä venymämittausaineistosta. Kuvissa on esitetty InterCity-junan veturin ja kahden ensimmäisen vaunun mitatut venymä-aika-kuvaajat kaikista neljästä mittauspaikasta. X-akselilla on aika sekunneissa ja y-akselilla ruuviin instrumentoidun venymäliuskan mittaama suhteellinen venymä mikrometreissä eli millimetrin tuhannesosissa. Kaikissa kuvaajissa on esitetty muodonmuutokselle (y-akseli) samanpituinen asteikko, jotta eri mittauspaikoista saatujen venymien suuruuksien vertailu olisi helpompaa. Kuvaajassa havaittavat piikit ovat yksittäisen telin pyöräkertojen aiheuttamia kuormituspiikkejä. Eri ruuveista rekisteröidyt venymät on eroteltu eri väreillä.



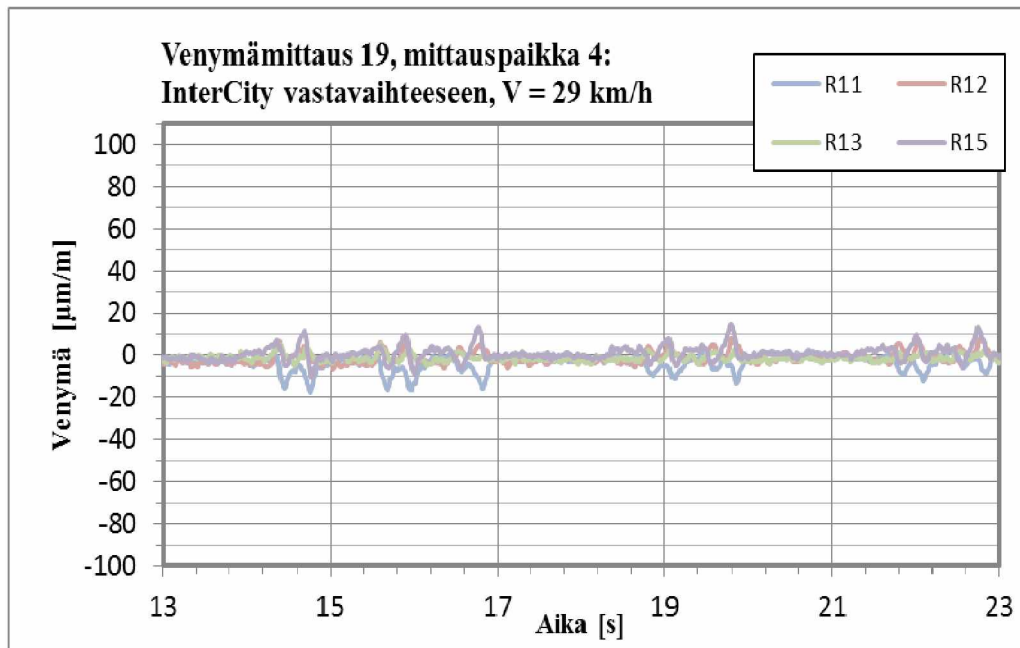
Kuva 61 InterCity-junan venymä-aika-kuvaaja, mittauspaikka 1.



Kuva 62 InterCity-junan venymä-aika-kuvaaja, mittauspaikka 2.



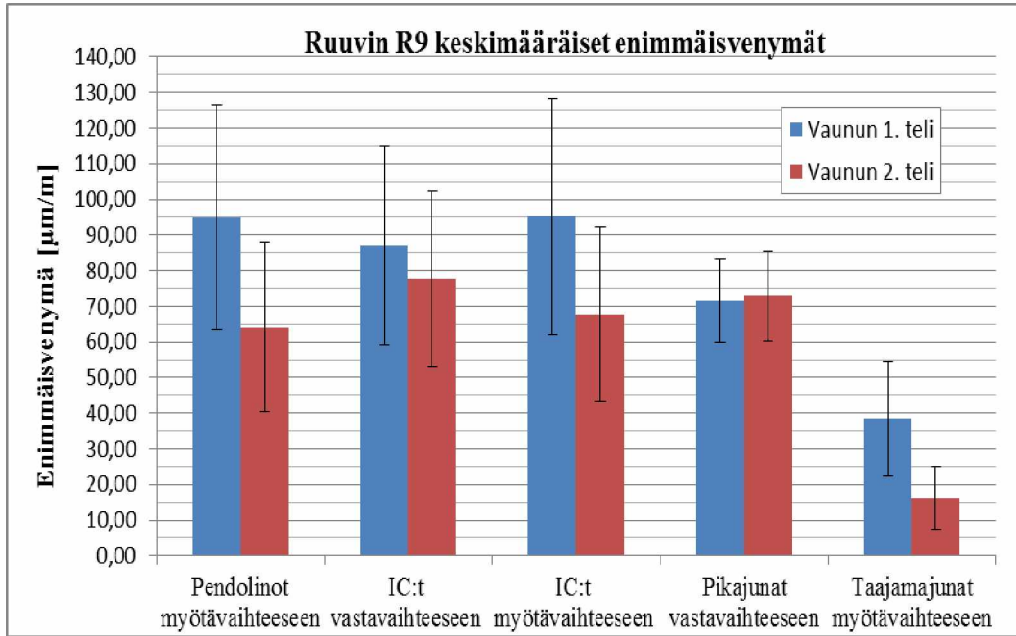
Kuva 63 InterCity-junan venymä-aika-kuvaaja, mittauspaikka 3.



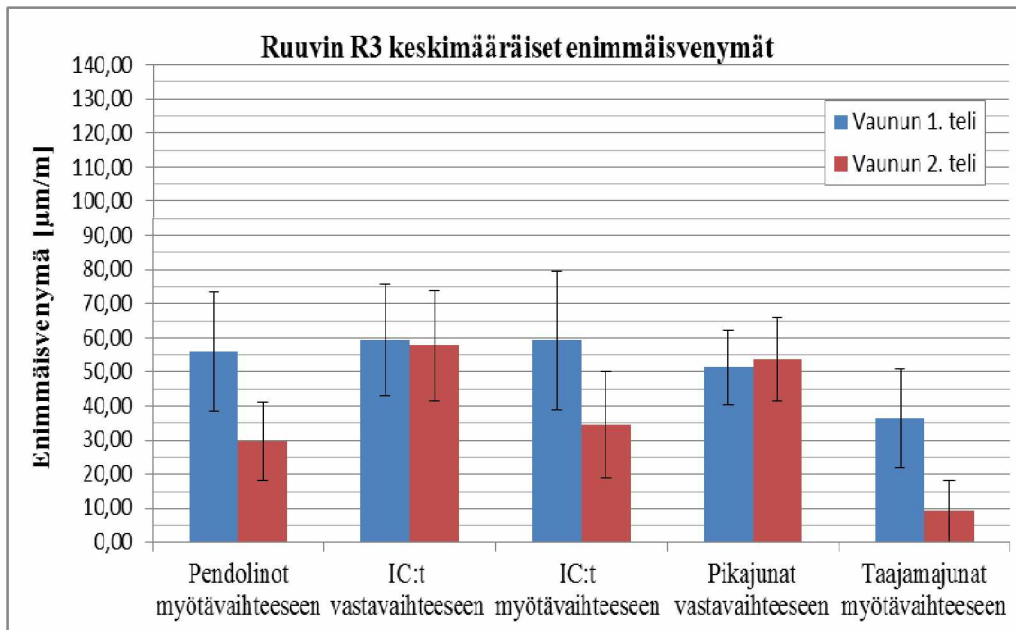
Kuva 64 InterCity-junan venymä-aika-kuvaaja, vertailumittauspaikka 4.

Eri mittauspaikoista saatuja venymä-aika-kuvaajia vertailemalla nähdään, että suurimmat venymät raideruuveihin syntyvät mittauspaikassa 1, vastakiskosovituksen keskimmaisessa vastakiskopukissa. Vertailumittauspaikassa (mittauspaikka 4), jossa kuormitukset olivat odotetusti pienimmät, junan akselien aiheuttamat kuormituspiikit ovat vain juuri ja juuri havaittavissa, ja ruuvien venymät ovat lähes samansuuruisia. Vertailumittauspaikassa matkustajakalustosta aiheutuvat venymän enimmäisarvot ruuveissa olivat suuruudeltaan keskimäärin $15 \mu\text{m/m}$. Mittauspaikan 1 ruuvissa R9 havaitut matkustajakalustosta aiheutuvat enimmäisvenymät olivat keskimäärin viisinkertaiset ja ruuvissa R3 keskimäärin kolminkertaiset vertailumittauspaikan ruuvien venymiin verrattuna. Mittauspaikan 1 ruuvien R2 ja R10 enimmäisvenymät puolestaan olivat keskimäärin 30 % pienemmät kuin vertailumittauspaikassa. Ruuvissa R9 oli havaittavissa myös mittauspaikan 1 suurin negatiivinen venymä. Mittauspaikassa 2 suurimmat enimmäisvenymät syntyivät ruuviin R4, jonka keskimääräinen matkustajakalustosta aiheutuva enimmäisvenymä oli $28 \mu\text{m/m}$ eli lähes kaksinkertainen vertailumittauspaikan enimmäisvenymiin verrattuna. Muilla mittauspaikan 2 ruuveilla venymän enimmäisarvot olivat keskimäärin samansuuruisia kuin vertailumittauspaikassa. Mittauspaikassa 3 ruuvien havaittu venymäkäyttäytyminen poikkesi muista mittauspaikoista. Kaikissa mittauspaikan 3 ruuveissa matkustajakaluston akselien aiheuttamat suurimmat kuormituspiikit suuntautuivat alaspäin eli venymäliuska painui kaasaan kuormitettaessa. Negatiiviset venymäpiikit olivat suurimmillaan ruuveissa R14, R16 ja R18. Ruuveissa R18 ja R16 oli lisäksi havaittavissa myös positiiviset venymät. Suurin negatiivisen ja positiivisen venymän erotus mittauspaikassa 3 oli havaittavissa ruuvissa R16. Samasta kohdasta oli keväällä havaittu katkennut ruuvi.

Ruuvien venymissä oli havaittavissa selviä eroja myötä ja vastavaihteeseen ajaneitten junien välillä. Vastavaihteeseen ajettaessa junanvaunujen ensimmäisen ja toisen telin aiheuttamat venymät olivat keskimäärin samansuuruisia. Myötävaihteeseen ajettaessa ensimmäisen telin aiheuttama venymä oli keskimäärin suurempi kuin toisen telin aiheuttama venymä. Tätä eroa on havainnollistettu kuvissa 65 ja 66, joissa on esitetty ruuvien R9 ja R3 keskimääräiset enimmäisvenymät kalusto- ja suuntakohtaisesti.



Kuva 65 Ruuvien R9 keskimääräiset enimmäisvenymät.



Kuva 66 Ruuvien R3 keskimääräiset enimmäisvenymät.

Taulukossa 8 on esitetty enimmäisvenymien laskentaan käytetty mittausaineisto. InterCity-junissa yksi- ja kaksikerrosvaunuja ei ole erikseen eroteltu, sillä laskennassa käytettävien telien määrä olisi muuten jäänyt hyvin pieneksi. Veturien telien aiheuttamat enimmäisvenymät on myös laskettu mukaan aineistoon.

Taulukko 8 Enimmäisvenymien laskentaan käytetty mittausaineisto.

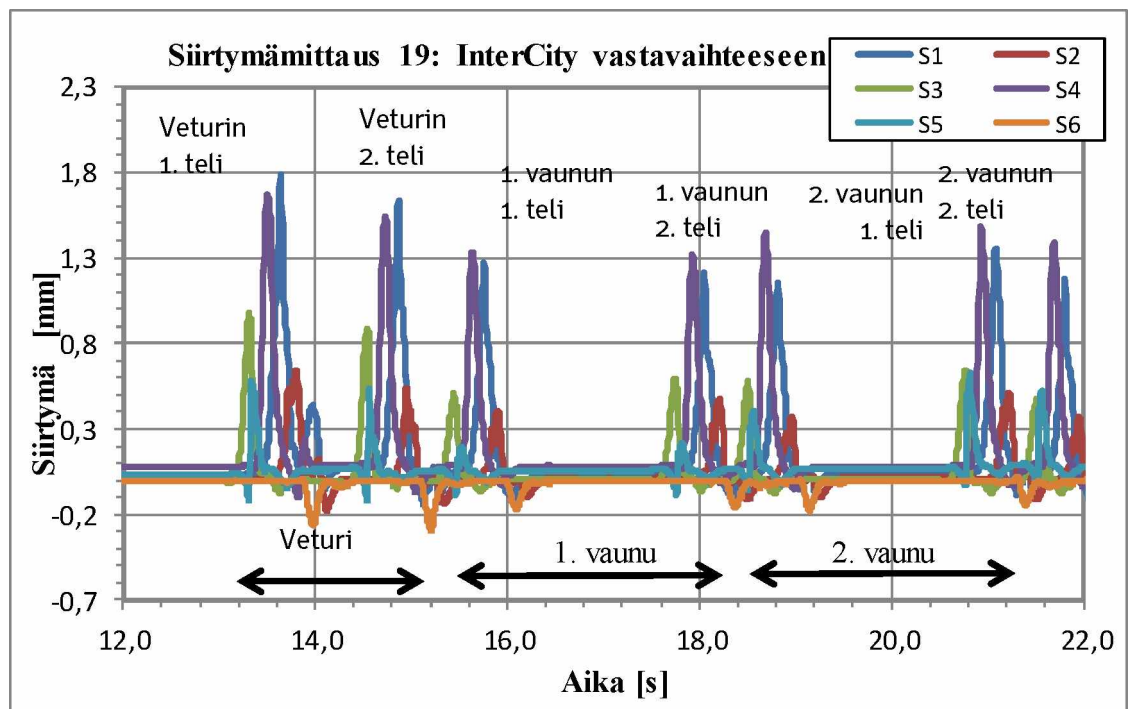
	Junien määrä	Telien määrä
Pendolino-junat myötävaihteeseen	6	36
InterCity-junat vastavaihteeseen	5	35
InterCity-junat myötävaihteeseen	4	16
Pikajunat vastavaihteeseen	3	17
Taajamajunat myötävaihteeseen	3	6

Vertailumittauspaikkaa lukuun ottamatta kaikissa mittauspaikoissa havaitut venymät jakautuivat epätasaisesti neljän ruuvien kesken. Vastakiskosovituksen keskellä mittauspaikassa 1 tämä ero oli erityisen suuri. Kaikkien kahdeksan ruuvien mittauspaikoissa 1 ja 2 havaittiin katkenneen keväällä 2012. Todennäköisesti katkeaminen on edennyt ketjureaktiona siten, että ensimmäisen ruuvien katkettua muihin ruuveihin kohdistuva kuormitus on lisääntynyt ja tämä on johtanut edelleen seuraavien ruuvien katkeamiseen. Tästä työstä saatujen mittaustulosten perusteella vaikuttaisi siltä, että katkeaminen vastakiskosovituksessa alkaa keskimmäisen vastakiskopukin ruuveista.

Mielenkiintoista olisi ollut nähdä, miten ruuvit käyttäytyvät, jos niiden paikkaa kiinnityksessä olisi vaihdettu. Näin olisi varmuudella voitu selvittää, miten koekuormituksessa havaitut erot eri ruuvien venymissä vaikuttavat mittaustuloksiin.

6.2 Siirtymämittaus

Kuvassa 67 on esimerkki mittauksien avulla kerätystä siirtymämittausaineistosta. Kuvassa on esitetty InterCity-junan veturin ja kahden ensimmäisen vaunun mitattu siirtymä-aika-kuvaaja. Kuvaajassa havaittavat piikit ovat yksittäisen akselin pyöräkerrojen aiheuttamia siirtymiä vastakiskossa sekä ruuvissa R18. Eri mittauspisteistä rekisteröidyt siirtymät on eroteltu eri väreillä.



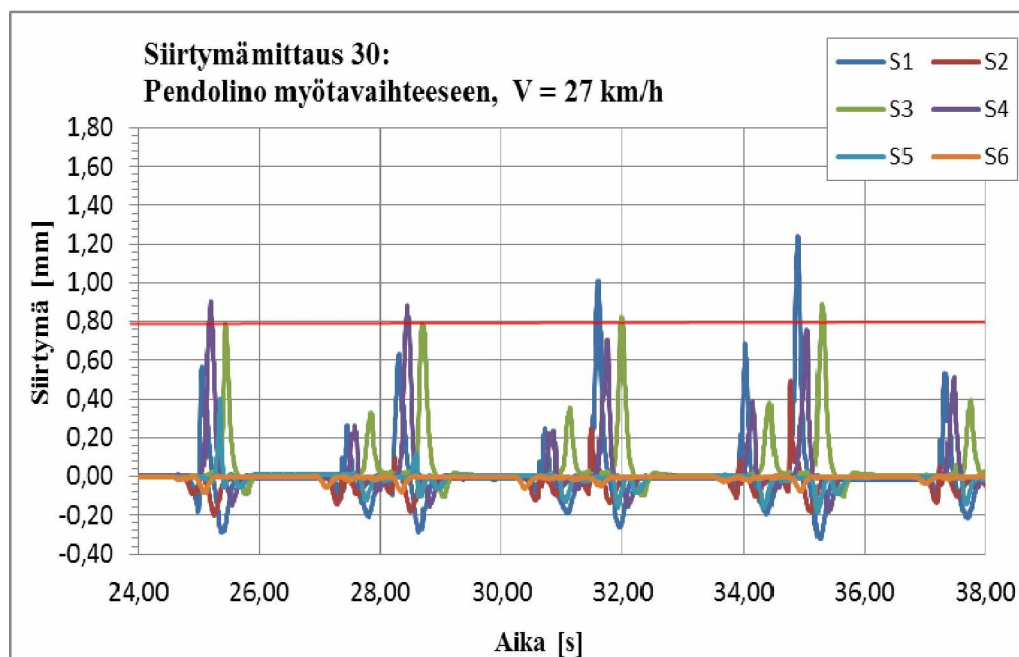
Kuva 67 Esimerkki siirtymämittausdatasta, InterCity-junan veturi ja kaksi ensimmäistä vaunua.

Suurin rekisteröity yhdensuuntainen matkustajakalustosta aiheutunut siirtymä havaittiin myötävaihteeseen ajaneen InterCity-junan veturin ensimmäisen telin kohdalla mittauspisteessä S1, jossa vastakiskon siirtymä tukikiskosta poispäin eli liike siirtymäanturia kohti oli 1,77 mm. Yleisesti kaikki suurimmat mitatut siirtymät havaittiin yksittäisten vetureiden ja veturivetoisten junien veturien ensimmäisen telin kohdalla. Tämä oli odotettavaa, sillä vaihteen jännitystila kokee suurimman muutoksen kun junan ensimmäisen vaunun ensimmäinen teli siirtyy vaihteeseen, ja vaihteen jännitystilassa tapahtuu nopea muutos lepotilasta kuormitettuun tilaan. Lisäksi vetureiden suurempi massa kuormittaa vaihdetta enemmän verrattuna kevyempiin matkustajavaunuihin ja juniin.

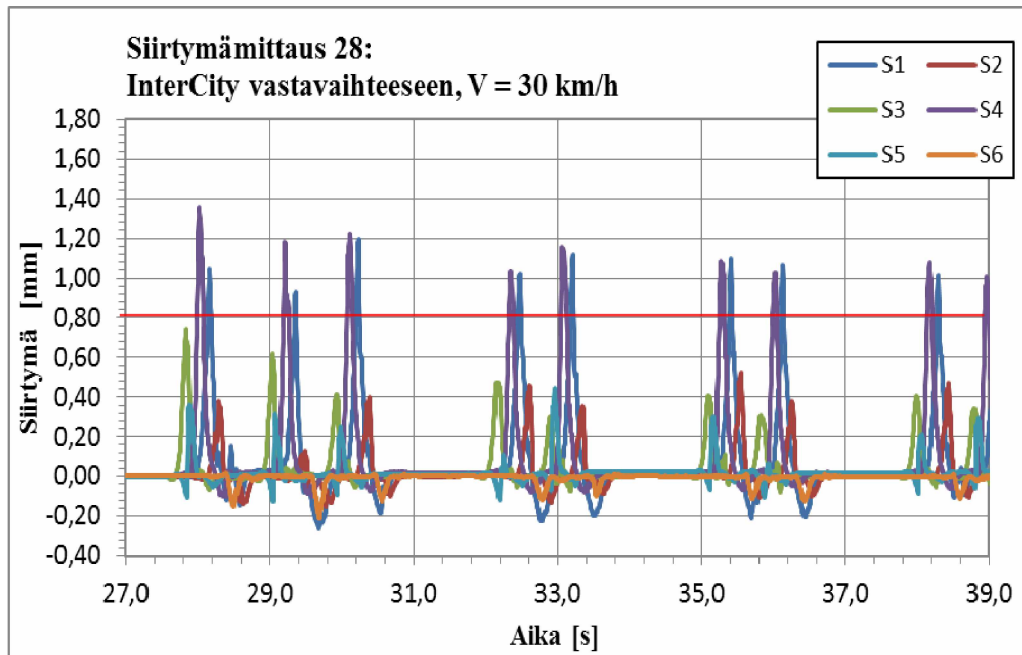
Kuvissa 67–73 on esitetty mitattuja siirtymä-aika – kuvaajia kalustotyypeittäin. Vertailun helpottamiseksi ja kuvien selkeyttämiseksi jokaisessa kuvaajassa on esitetty kustakin junasta enintään neljän ensimmäisen vaunun aiheuttamat siirtymäpiikit. Veturivetoisissa junissa veturi on laskettu mukaan neljään ensimmäiseen vaunuun.

Kuvaajia tarkastelemalla voidaan havaita, että suurimmat junakuormasta johtuvat siirtymät syntyvät vastakiskon mittauspisteisiin S1 ja S4 sekä risteysalueella sijaitsevaan raideruuviin R16 mittauspisteessä S3. Näiden kolmen siirtymän keskinäinen suuruusjärjestys vaihtelee selkeästi sen mukaan, ajetaanko myötä- vai vastavaihteeseen. Vastavaihteeseen ajettaessa siirtymä mittauspisteessä S3 on jatkuvasti pienempi kuin siirtymät mittauspisteissä S1 ja S4, kun taas myötävaihteeseen ajettaessa siirtymien keskinäinen suuruus vaihtelee.

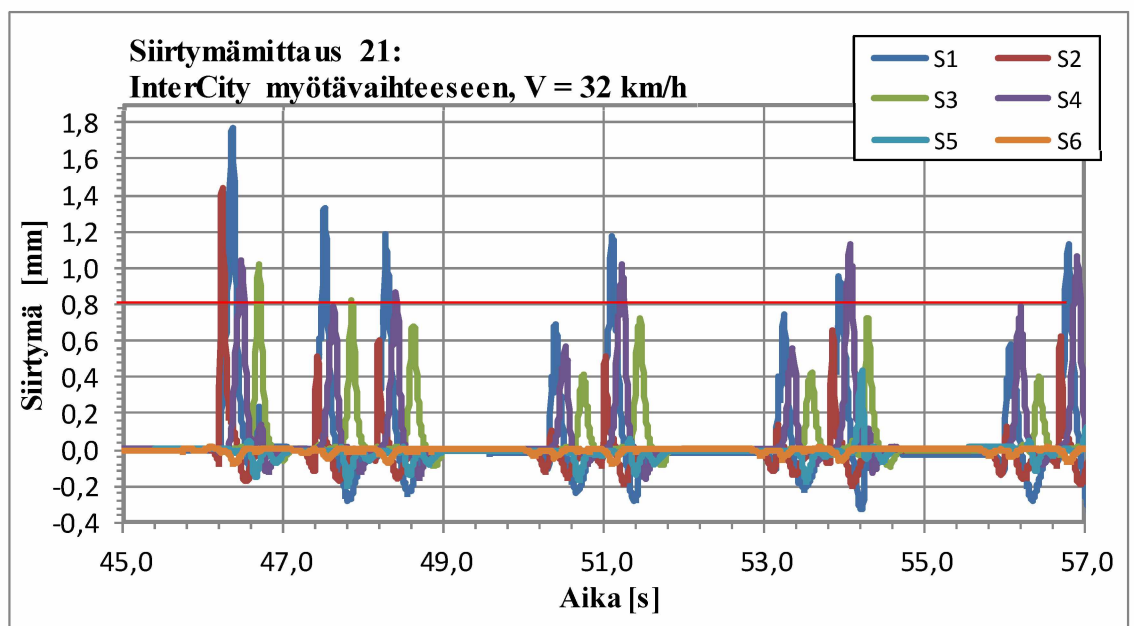
Kuvaajia vertailtaessa voidaan myös huomata, että Pendolino-junien siirtymäaika kuvaajat poikkeavat yhdellä erityisellä tavalla muitten kalustotyyppien siirtymäaika kuvaajista. Kaikilla mitatuilla Pendolino-junilla kunkin vaunun ensimmäisen telin aiheuttama siirtymä on merkittävästi suurempi kuin saman vaunun toisen telin aiheuttama siirtymä, kun taas muilla kalustotyypeillä ensimmäisen ja toisen telin aiheuttamien siirtymien suuruusjärjestys vaihtelee ja niiden välinen erotus on pienempi.



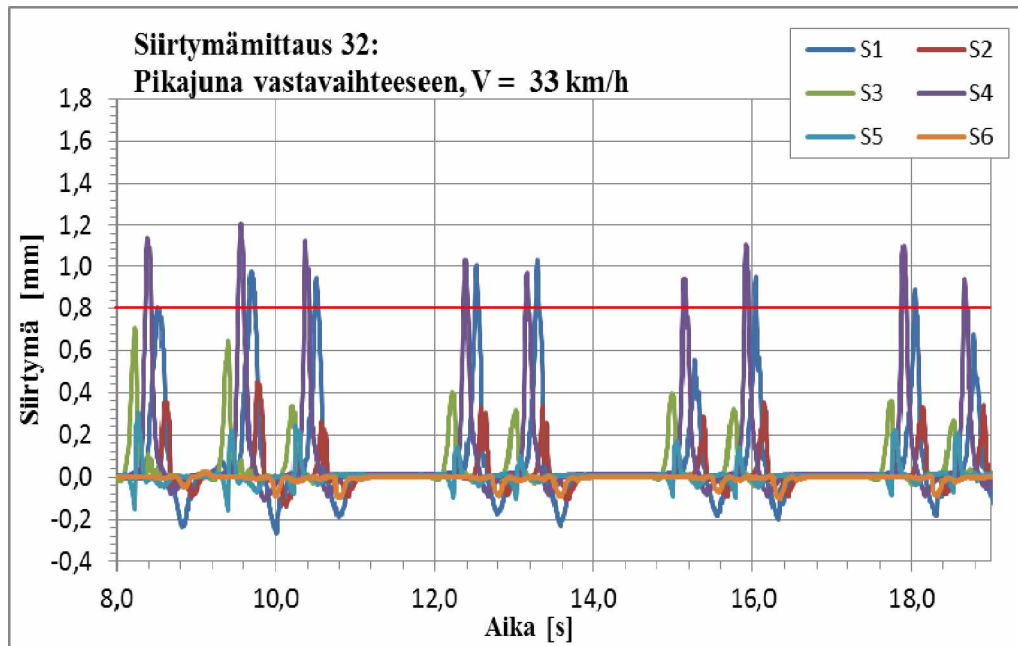
Kuva 68 Siirtymä-aikakuvaaja: Pendolino-juna myötävaihteeseen.



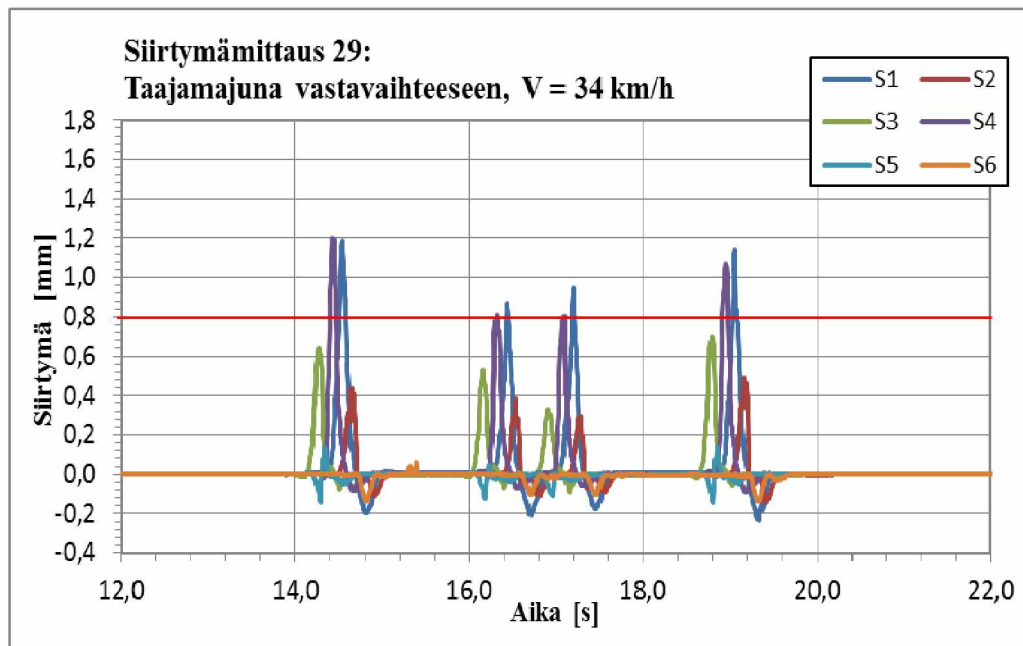
Kuva 69 Siirtymä-aikakuvaaja: InterCity-juna vastavaihteeseen.



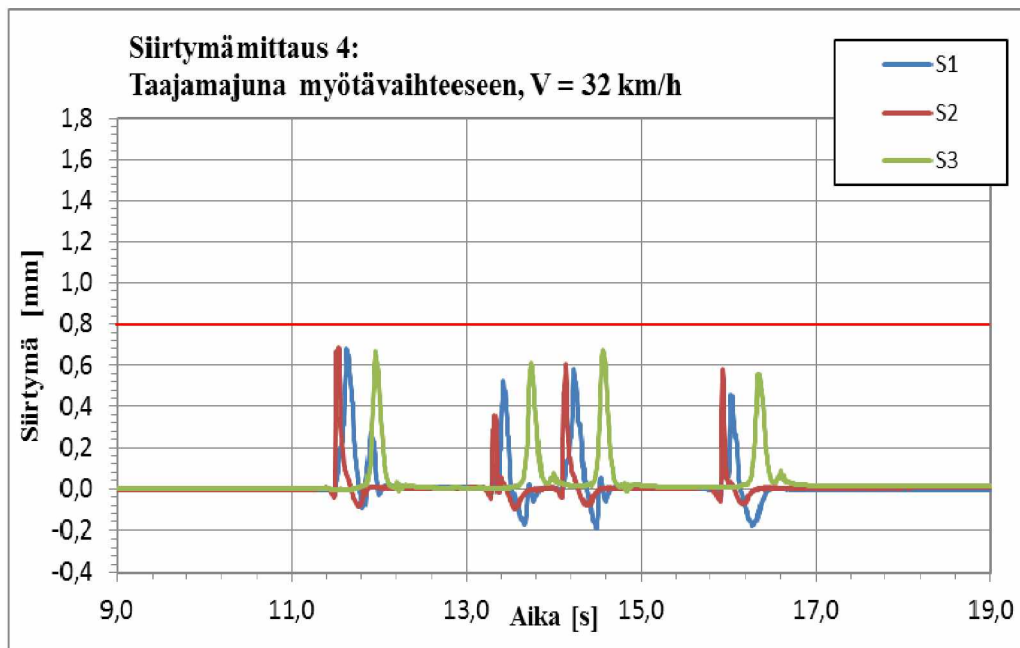
Kuva 70 Siirtymä-aikakuvaaja: InterCity-juna myötävaihteeseen.



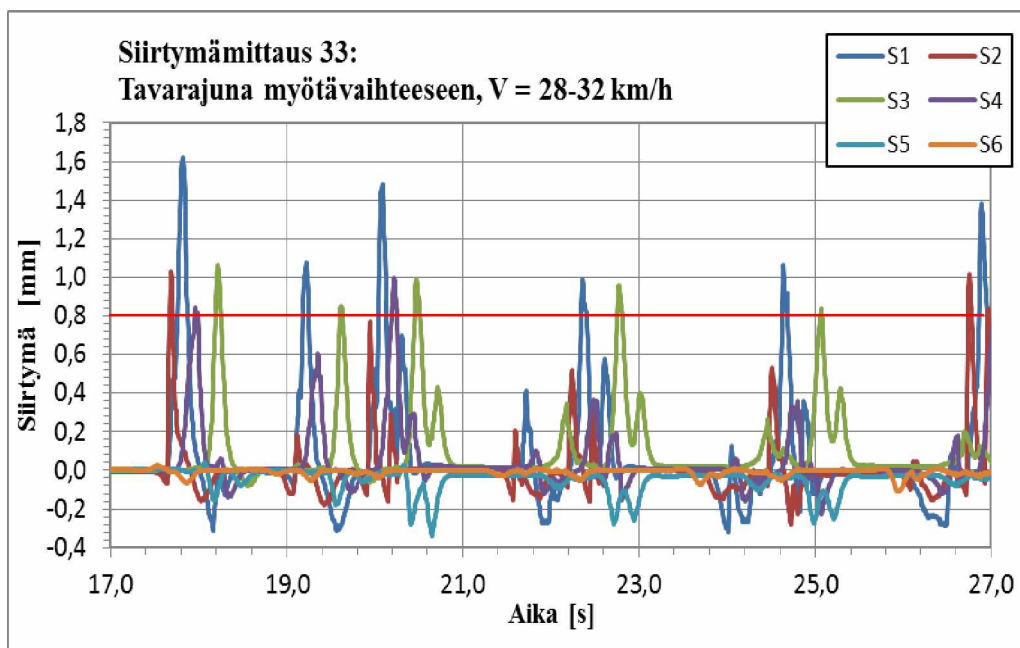
Kuva 71 Siirtymä-aika -kuvaaja: Pikajuna vastavaihteeseen.



Kuva 72 Siirtymä-aika -kuvaaja: Taajamajuna vastavaihteeseen.



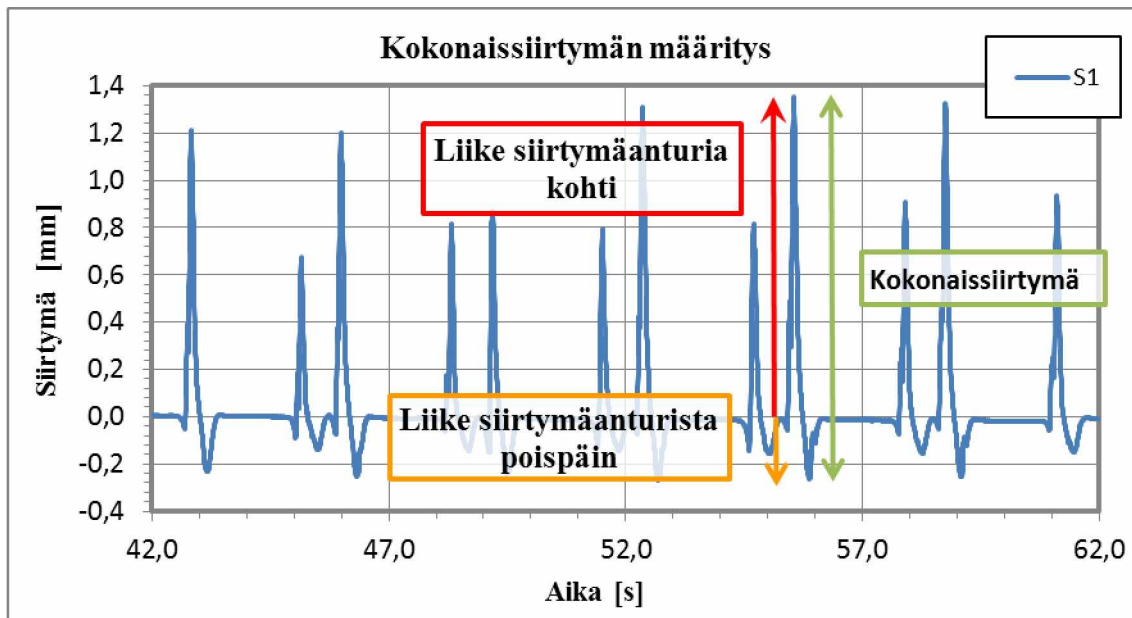
Kuva 73 Siirtymä-aika -kuvaaja: Kiskobussi myötävaihteeseen.



Kuva 74 Siirtymä-aika -kuvaaja: Tavarajuna myötävaihteeseen.

Jotta kalustokohtaisia siirtymämittauksia voitaisiin vertailla jollain tapaa yhdessä kuvassassa, kaikki siirtymädata käytiin läpi mittaus kerrallaan ja jokaiselle mitatulle kalustoyksikölle laskettiin telikohtaiset kokonaissiirtymät. Telikohtaiset kokonaissiirtymät mittauspisteissä S1-S6 saatiin kuvan 73 mukaisesti laskemalla yhteen yhden telin aiheuttama siirtymäanturia kohti sekä siirtymäanturista pois päin suuntautunut liike. Koska suurimmat kokonaissiirtymät havaittiin mittauspisteessä S1, valittiin mittauspisteen S1 kokonaissiirtymät kalustokohtaiseen vertaillun. Mittauspisteen S1 siirtymät olivat mielenkiintoisia myös siinä suhteessa, että mittauspisteen kohdalla olevasta vastakiskopukissa kaikki raideruuvit olivat katkenneet edellisen vuoden aikana.

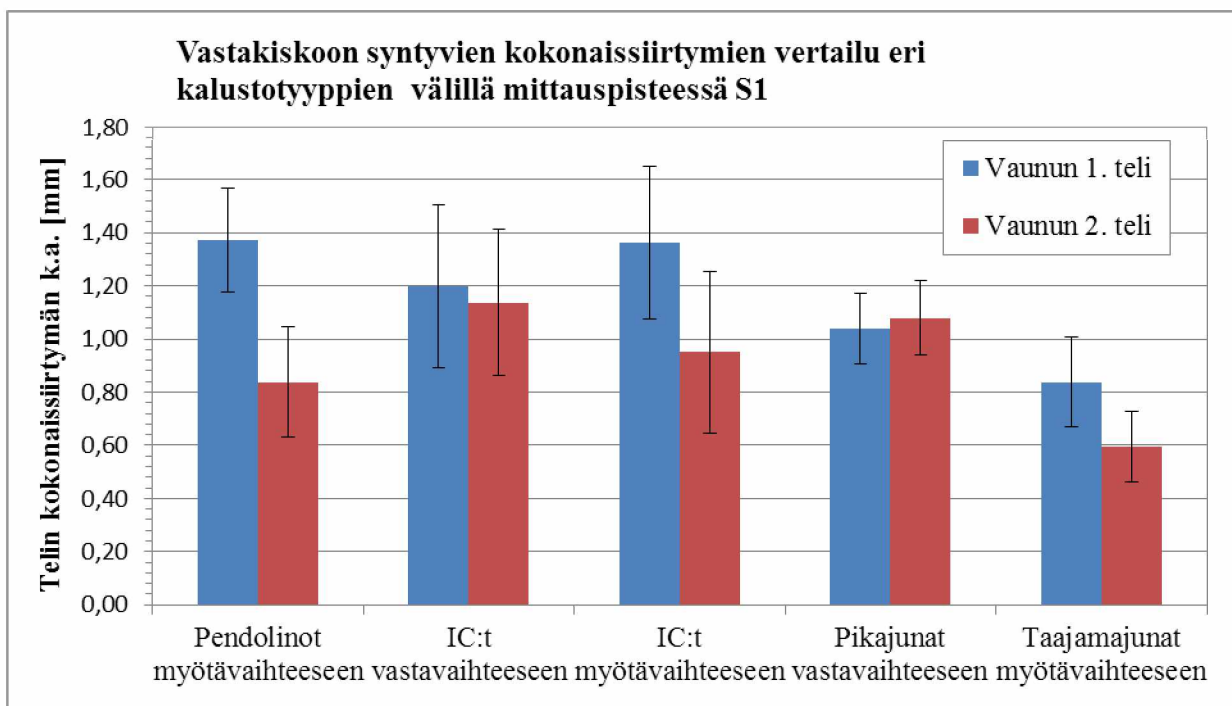
Kalustokohtaisessa vertailussa siirtymämittaustietä mittauspisteestä S1 yhdistettiin kalusto- ja suuntakohtaisesti. Telikohtaiset kokonaissiirtymät jaettiin kahtia sen mukaan, oliko kyseessä vaunun ensimmäisen vai toisen telin aiheuttama siirtymä. Näin jokaiselle kalustotyyppille ja suunnalle saatiin laskettua vaunun ensimmäisen ja toisen telin mittauspisteeseen S1 aiheuttaman kokonaissiirtymän keskiarvot sekä kokonaissiirtymän vaihteluvälit.



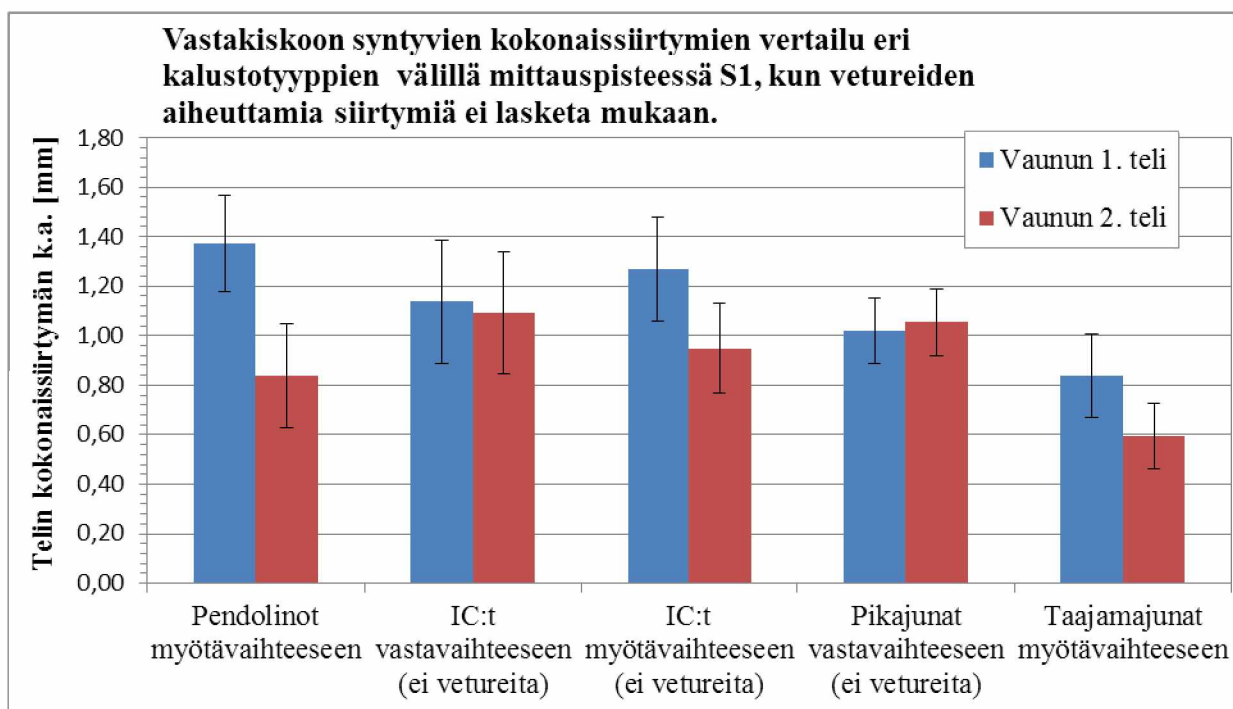
Kuva 75 Kokonaissiirtymän määrittäminen mittausaineistosta.

Kuviin 74 ja 75 on koottu eri kalustotyyppien vaunujen ensimmäisen ja toisen telin aiheuttaman kokonaissiirtymän keskiarvo poikkeavan raiteen vastakiskon keskellä mittauspisteessä S1. Ensimmäiseen kuvaan on laskettu veturivetoisissa junissa mukaan myös veturin telien aiheuttamat siirtymät. Toiseen kuvaan vetureiden siirtymiä ei ole laskettu mukaan. Kokonaissiirtymien laskennassa käytetyn aineiston laajuus vaihtelee, koska mittausaineistoa kustakin kalustotyyppistä oli saatavilla rajoitettu määrä. Taulukossa 9 on esitetty kuvaajien laskentaan käytetyn aineiston lukumäärä kalustokohtaisesti. Veturivetoisten junien telien määrässä ei ole otettu huomioon veturien kahta teliä.

Kuvista 74 ja 75 nähdään, että myötävaihteeseen ajava Pendolino-juna on ainoa kalustotyyppi, jossa 1. ja 2. telin aiheuttamien kokonaissiirtymän keskiarvon vaihteluvälit eivät kohtaa. Tämä aineiston perustella siis voidaan sanoa, että myötävaihteeseen ajavien Pendolino-junien mittauspisteisiin aiheuttama kuormitus on tasaisesti vaihtelevaa ja mahdollisesti myös raideruuvien kannalta väsyttävämpää verrattuna muiden kalustotyyppien tasaisempaan kuormitukseen. Mielenkiintoista olisi ollut saada mittausaineistoa myös vastavaihteeseen ajavasta Pendolino-junasta. Myötä- ja vastavaihteeseen ajaneitten InterCity-junien mittaukselliset tulokset antavat viitteitä siihen, että nimenomaan myötävaihteeseen ajaminen aiheuttaa vaunujen telien välillä vaihtelevan kuormituksen, ja että vastavaihteeseen ajettaessa kuormitus on tasaisempaa.



Kuva 76 Eri kalustotyyppien telien aiheuttamat kokonaissiirtymät mittauspisteessä S1, kun vetureiden siirtymät otetaan huomioon.



Kuva 77 Eri kalustotyyppien telien aiheuttamat kokonaissiirtymät mittauspisteessä S1, kun vetureiden aiheuttamia siirtymiä ei oteta huomioon.

Taulukko 9 Kokonaissiirtymien laskentaan käytettävissä oleva mittausaineisto.

	Junien määrä	Telien määrä
Pendolino-junat myötävaihteeseen	6	36
InterCity-junat vastavaihteeseen	4	24
InterCity-junat myötävaihteeseen	4	19
Pikajunat vastavaihteeseen	3	14
Taajamajunat myötävaihteeseen	3	6

6.3 Mittaustulosten luotettavuus

Tässä työssä tutkittujen mittausten määrä on tilastollisesta näkökulmasta todella vähäinen kalustokohtaisten mittausten otoskoon ollessa enimmillään kuusi, ja sen vuoksi saadut tulokset ovat vain suuntaa antavia. Jotta saadut tulokset olisivat edes jollain hyväksyttävällä tasolla tilastollisesti merkittäviä, mittauksia tulisi tehdä huomattavasti pidemmältä ajanjaksolta niin, että kalustokohtaisten mittausten otoskoko olisi ainakin 30.

Liitteessä 6 esitetyistä koekuormituksen tuloksena saaduista jännitys-venymäkäyristä nähdään, että instrumentoitujen ruuvien käyttäytymisessä kuormituksen alaisina on suurta hajontaa. Suurimmassa osassa ruuveista venymä oletetusti kasvoi taivuttavan kuorman kasvaessa, mutta muutamassa ruuvissa venymä puolestaan taas pieneni taivuttavan voiman kasvaessa. Tätä voidaan selittää osittain sillä, että ruuvin sisälle liimattu lieriön muotoinen venymäliuska ei kata poratun reiän vaipan alaa aivan 360 asteen alueelta. Mittauksissa käytetty venymäliuskalieriö on koottu suoralukmionmuotoisesta venymäliuskasta ja lieriössä on epäjatkuvuuskohta siinä kohdassa, jossa suoralukmion päät kohtaavat. Sen mukaan, mihin kohtaan venymäliuskan epäjatkuvuuskohta ruuvia pölkkyyn kiristettäessä asettuu, venymäliuska voi kuormituksen alaisena käyttäytyä eri tavoin. Jos epäjatkuvuuskohta on taivutuksen alaisessa ruuvissa sillä puolella ruuvia, jossa on enemmän vetoa, venymäliuska rekisteröi paremmin puristuksen puolella tapahtuvan pinta-alan muutoksen ja näin venymä pienenee kuormituksen kasvaessa. Jos epäjatkuvuuskohta taas on puristuksen puolella, venymäliuska rekisteröi paremmin vedon puolella tapahtuvan pinta-alan muutoksen ja näin venymä kasvaa kuormituksen kasvaessa.

Venymäliuskat pyrittiin asentamaan niin, että liuskalieriön epäjatkuvuuskohta asetuisi jokaisessa ruuvissa samaan kohtaan ruuvin kantaan nähden. Kiristettäessä ruuveja koekuormituksessa käytettyyn pölkkyyn huomattiin että ruuvit eivät asetu pölkkyssä samansuuntaisesti, vaan ruuvin kannan asento vaihteli täysin satunnaisesti, ja näin myös venymäliuskan epäjatkuvuuskohta asettui täysin satunnaisesti.

Koekuormituksessa saatujen jännitys-venymäkäyrien hajontaa voidaan selittää myös venymäliuskan liimauksen epätasaisuudella. Kuten luvussa 5.1.3 todettiin, kuormituksen alaisen materiaalin venymä siirtyy materiaalin pintaan kiinnitettyyn venymäliuskaan ilman häviötä vain, jos venymäliuska on erittäin hyvässä kosketuksessa materiaalin pintaan. On hyvin mahdollista että liimaus jossain ruuveissa onnistui vain osittain, eikä venymäliuska ole kiinnittynyt kunnolla reiän seinämään koko reiän vaipan alueelta.

7 Yhteenveto, päätelmät ja suositukset

Tässä työssä pyrittiin selvittämään, miksi lyhyiden YV60–300–1:9 vaihteiden kiskonkiinnitykseen käytetyt raideruuvit vaurioituvat ennenaikaisesti lyhyissä vaihteissa Tampereen ratapihalla. Tutkimusmenetelminä käytettiin kirjallisuutta, laboratorio- tutkimuksia sekä kenttätutkimuksia. Kirjallisuustutkimuksen ensimmäisessä osassa käytiin läpi rautatievaihteiden yleistä termistöä, rakennetta ja osia sekä vaihteiden kunnossapitoa koskevia käytäntöjä. Kirjallisuustutkimuksen toisessa osassa pyrittiin perehtymään vaihteen ja kaluston väliseen vuorovaikutukseen ja siihen, millaiset kaluston ominaisuudet vaikuttavat eniten kalustosta vaihteeseen kohdistuviin voimiin. Kirjallisuustutkimuksen kolmannessa osassa perehdyttiin lyhyesti raideruuvien materiaaliominaisuuksiin ja lujuusvaatimuksiin, sekä esiteltiin kaksi raideruuvien vaurioitumiseen liittyvää ulkomaista tutkimusta.

Tampereen ratapihalle tehdyillä maastokäynneillä huomattiin, että raideruuvien katkeamista tapahtuu lyhyissä vaihteissa erityisesti poikkeavan raiteen vastakiskosovituksessa sekä poikkeavan raiteen ulkokiskossa lähellä vaihteen risteystä. Kenttätutkimuksia varten yksi Tampereen ratapihan vaihteista, TPE V011, valittiin tarkempaan tutkimukseen. Tutkimusvaihteen valintaan vaikutti erityisesti sen hyvä saavutettavuus ajoneuvolla sekä vaihteessa havaittujen raideruuvivaurioiden määrä.

Ennen kenttätutkimuksia Tampereen ratapihalta kerättyjen katkenneiden raideruuvien murtopintoja tarkasteltiin lähemmin laboratoriossa. Murtopinnoista otetuista suurennetuista valokuvista voitiin havaita selviä väsymismurtuman jälkiä. Laboratoriossa testattiin myös kenttäkokeessa käytettyjen venymäliuskoilla instrumentoitujen raideruuvien toimivuutta ruuvien venymän mittauksessa. Koekuormitus osoitti, että ruuvin sisälle liimatun venymäliuskan käyttäytymisessä taivuttavan kuormituksen alla oli suuria eroja eri ruuvien välillä.

Kenttätutkimuksissa venymäliuskoilla instrumentoituja raideruuveja asennettiin tutkimusvaihteeseen yhteensä 16, neljä ruuvia kuhunkin neljään eri mittauspaiikkaan. Mittauspaikat yksi ja kaksi sijaitsivat vastakiskosovituksessa, mittauspaiikka kolme poikkeavan raiteen ulkokiskossa lähellä risteystä ja mittauspaiikka neljä vertailumittauspaikkana poikkeavan raiteen takajatkoksessa. Lisäksi vaihteeseen asennettiin kuusi siirtymäanturia, joista viisi asennettiin mittaamaan vastakiskon siirtymää ja yksi mittauspaiikkaan kolme mittaamaan yhden instrumentoidun ruuvin yläpään siirtymää. Kahden päivän mittauksen aikana saatiin mittauskalustolla rekisteröityä yhteensä 36 eri kalustoyksiköiden yliajoa vaihteessa.

Neljästä mittauspaikasta saatuja venymämittaustuloksia vertailemalla voitiin havaita, että matkustajakalustosta aiheutuvat rasitukset eivät kaikkialla jakaudu tasaisesti kiskonkiinnityksen neljän raideruuvien kesken. Vertailumittauspaikassa, jossa kuormitus oli odotetusti vähäisintä, neljän raideruuvien mitatut venymät olivat lähes samansuuruisia, venymän enimmäisarvon ollessa keskimäärin 15 µm/m. Suurimmat ja epätasaisimmat venymät raideruuveihin syntyivät mittauspaikassa yksi, vastakiskosovituksen keskimmaisessä vastakiskopukissa, jossa kahden raideruuvien mitatut keskimääräiset enimmäisvenymät olivat keskimäärin toisessa viisin- ja toisessa kolminkertaiset verrattuina vertailumittauspaikan raideruuvien keskimääräiseen enimmäisvenymään. Keskimmaisen vastakiskopukin kahden muun ruuvien keskimääräiset enimmäisvenymät olivat puolestaan keskimäärin hiukan pienempiä kuin vertailumittauspaikassa. Vastakiskosovituksen toisessa mittauspaikassa, mittauspaikassa kaksi,

yhden ruuvin keskimääräinen enimmäisvenymä oli kaksinkertainen vertailuarvoon verrattuna. Saman mittauspaikan kolmen muun ruuvin keskimääräiset enimmäisvenymät olivat keskimäärin samansuuruisia kuin vertailuarvo. Mittauspaikassa 3 raideruuvien venymäkäyttäytyminen poikkesi täysin muista mittauspaikoista. Kaikkien ruuvien havaitut kuormituspiikit suuntautuivat alaspäin, eli venymäliuska painui kuormitettaessa kasaan.

Vaihteen poikkeavan raiteen vastakiskossa sijaitsevista viidestä siirtymämittauspisteistä suurimmat siirtymät havaittiin vastavaihteeseen katsottuna kolmannessa ja viidennessä eli keskimmaisessa vastakiskopukissa, yksittäisten vetureiden ja veturi-vetoisten junien veturien ensimmäisen telin yliajoissa. Keskimmäisen vastakiskopukin siirtymämittausaineistolle tehty vertailu paljasti, että myötävaihteeseen ajettaessa junavaunujen ensimmäinen teli aiheutti suuremman siirtymän kuin jälkimmäinen teli. Kyseinen käyttäytyminen oli erityisen selvästi havaittavissa Pendolino-junien ajaessa vaihteen läpi.

Raideruuvivaurioiden laajuuden ja vuosittaisen toistuvuuden perusteella voidaan varmasti sanoa, että raideruuvien katkeaminen ei johdu yksittäisen raideruuvierän valmistus- tai materiaaliveirheestä, vaan katkeaminen on selvästi seurausta ruuveihin kohdistuvasta toistuvasta väsyttävästä kuormituksesta. Ruuveja katkeaa erityisesti vaihteen epäjatkuvuuskohdissa, joissa kalustosta vaihteeseen syntyvät kuormat ovat suurimpia. Venymämittaustulokset eivät antaneet syytä epäillä, että ruuvien katkeaminen olisi kytköksissä johonkin tiettyyn kalustotyyppiin, vaan pikemminkin ajosuuntaan, sillä myötävaihteeseen ajaneiden junien vaihtuva-amplitudinen kuormitus väsyttää rakenneterästä nopeammin kuin tasa-amplitudinen kuormitus. Tästä työstä saatuihin mittaustuloksiin kuitenkin syytä suhtautua varauksella, sillä tilastollisesta näkökulmasta mitatun aineiston määrä on todella vähäinen. Varmemmat mittaustulokset saataisiin vain pitempikestoisilla mittauksilla, jossa kalusto- ja suuntakohtaisten mittausten määrä olisi vähintään 30, jolloin tuloksia voitaisiin pitää hyväksyttävällä tasolla tilastollisesti pitävinä.

Tämän työn kirjallisuustutkimuksen ohessa esitetyssä tutkimuksessa on huomattu, että vaihteen geometriaa optimoimalla voidaan vaihteeseen kalustosta kohdistuvaa sivuttaissuuntaista kuormaa tasata. Geometrian optimoinnilla voitaisiin siis mahdollisesti pienentää raideruuveihin kohdistuvan kuormituksen tasoa ja ehkäistä ruuvien ennen aikaista vaurioitumista. Käytännössä geometrian optimointi edellyttäisi täysin uudenlaisen vaihteen kehittämistä, rakentamista ja asentamista, eikä se siten sovellu nopeasti käytettävissä olevaksi ratkaisuksi raideruuvien katkeamisongelmaan.

R170-P raideruuveja koskeva ohjeistus on osin ristiriitaista. RATO-ohjeet antavat raideruuvien lujuusluokaksi 5.6. Uusina hankittavia 54E1- ja 60E1-vaihteita koskevat tekniset toimitusehdot eivät puolestaan määritä raideruuville lujuusluokkaa, mutta määräävät kuitenkin, että raideruuvien lujuusluokka tulee merkitä raideruuvien kantaan. Lisäksi ohjeessa viitataan raideruuvien tyyppipiirustukseen, jossa raideruuvien lujuusluokaksi annetaan 4.6, ja jossa lujuusluokkaa ei ohjeisteta merkittäväksi ruuvien kantaan. R170-P raideruuvien ohjeistusta voitaisiin yhtenäistää niin, että molemmissa raideruuveja käsittelevissä ohjeissa olisi täsmälleen sama ohjeistus. Lisäksi raideruuvien tyyppipiirustus tulisi päivittää vastaamaan ohjeita lujuusluokan ja sen merkitsemisen osalta.

Valtaosa Tampereen ratapihalta tätä työtä varten kerätyistä katkenneista raideruuveista oli vuoden 2001 valmistuserästä. Yhdessäkään tutkitussa raideruuvissa ei ollut lujuusluokkamerkintää. Metlab Oy:n tekemien raideruuvien vetokokeiden tulokset osoittavat, että vuonna 2002 valmistetut raideruuvit ovat vanhan 4.6 lujuusluokkavaatimuksen mukaisia, vaikka raideruuvien lujuusluokan vähimmäisvaatimus on ollut 5.6 vuodesta 2000 lähtien. Rakennetekniikan laboratoriossa vuoden 2011 valmistuserän raideruuville teetetyn vetokokeen tuloksen perusteella voidaan kuitenkin todeta, että ainakin testattu ruuvi, ja luultavasti myös muut samasta valmistuserästä olevat ruuvit, täyttävät lujuusluokalle asetetut vaatimukset. Edellä esitettyjen tulosten valossa voidaan siis olettaa, että kaikki vuonna 2002 ja sitä ennen valmistetut raideruuvit ovat lujuusluokaltaan 4.6. ja että jossain vuosien 2002 ja 2011 välillä raideruuveja on alettu valmistaa vaaditussa lujuusluokassa 5.6. Jos tämä oletus pitää paikkansa, kaikki Tampereen ratapihalla havaitut katkenneet raideruuvit ovat alempaa lujuusluokkaa ja ruuvien katkeaminen johtuu yksinkertaisesti siitä, että ne ovat liian heikkoja käyttötarkoitukseensa. Yksinkertainen ratkaisu katkeamisongelmaan voisi siis olla nykyisten ruuvien korvaaminen vaatimuksenmukaisen lujuusluokan ruuveilla. Toinen vieläkin yksinkertaisempi vaihtoehto olisi korvata ainoastaan tässä tutkimuksessa vaurioalttiiksi havaittujen kiinnitysten ruuvit vahvempiin.

Jos vastaavanlaista tutkimusta raideruuveista aiotaan tehdä tulevaisuudessa, tulisi venymäliuskamittauksen koejärjestelyä kehittää. Mittauksista saatujen kokemusten perusteella venymäliuskaa ei tulisi liimata suoraan ruuvin sisälle porattavaan reikään, sillä tällöin venymäliuskan asentoa ja sijaintia ruuvissa ei pystytä havainnoimaan. Venymäliuskan koejärjestelyissä voitaisiin ottaa mallia Yhdysvaltalaisessa tutkimuksessa (Dick et al. 2007) esitetystä koejärjestelystä, jossa venymäliuska liimataan erilliseen, ruuviin porattuun reikään asetettavaan, sovittimeen. Tällöin venymäliuskan liimauksen onnistuminen voitaisiin havaita helpommin. Lisäksi venymäliuskan toimivuutta sovittimessa olisi mahdollista testata sellaisenaan suorassa vedossa sekä ruuvin sisälle asennettuna, jolloin venymäliuskan reaktioita näihin erityyppisiin kuormituksiin voitaisiin vertailla. Mittausdatan käsittelyä varten olisi myös syytä kehittää ohjelma, joka osaa automaattisesti poimia mittausdatasta yksittäisten kuormituspiikkien maksimit ja minimi, ja laskea niistä tarvittavat tunnusluvut.

Lähdeluettelo

Kirjallisuus ja muut julkaisut

Andersson, Evert. Berg, Mats. Stichel, Sebastian. 2007. *Rail vehicle dynamics*. Railway Group KTH, Centre for research and Education on Railway Engineering.

Austin, Tim. 2007. *Improvements in Track Fasteners to Cope With Heavy Axle Loads*. Lewis Bolt & Nut Company. Proceedings of the AREMA 2007 Annual Conferences C&S Technical Conference . Calgary, Alberta, Canada . 22.5.2007.

Bhat, S. & Patibandla, R. 2011. *Metal Fatigue and Basic Theoretical Models: A Review*, Alloy Steel - Properties and Use. Eduardo Valencia Morales (Ed.). ISBN: 978-953-307-484-9. Saatavilla: <http://www.intechopen.com/books/alloy-steel-properties-and-use/metal-fatigue-and-basic-theoretical-models-a-review>

Bonaventura, C. S., Zarembski, A.M., Palese, J. W. & Holfeld, D. R. 2004. *Increasing speed through turnouts*. Railway Track & Structures [Verkkolehti]. Vol. 100. Issue 7/2004. P. 20-23. ISSN 0033-9016.

Dowling, Norman E. 2007. *Mechanical Behaviour of Materials*. Pearson International Edition. Third Edition. ISBN 0-13-225609-6.

Dick, Matthew G., McConnell David S. & Iwand Hans C., 2007. *Experimental Measurement and Finite Element Analysis of Screw Spike Fatigue Loads*. ASME/IEEE 2007 Joint Rail Conference and Internal Combustion Engine Division Spring Technical Conference. No. JRC/ICE2007-40090. P. 161-166.

eFunda 2012. Engineering Fundamentals, an online directory. *High-cycle fatigue*. [www-sivu] Lainattu 3.8.2012. Saatavilla: http://www.efunda.com/formulae/solid_mechanics/fatigue/fatigue_highcycle.cfm

Höltkä, Pasi. 2011. *Rautatietekniikan opetusmoniste. Osa 5, vaihteet*. Saatavilla: <https://noppa.aalto.fi/noppa/kurssi/yhd-10.3503/materiaali>. Lainattu 21.6.2012.

International Heavy Haul Association (IHHA) 2001. *Guidelines to best practices for heavy haul railway operations: Wheel and rail interface issues*. USA.

Iwnicki, Simon. 2006. *Handbook of railway vehicle dynamics*. Taylor & Francis Group. ISBN-13: 978-0-8493-3321-7.

Johansson, Anders; Pålsson, Björn; Ekh, Magnus; Nielsen, Jens; Ander, Mats; Brouzoulis, Jim; Kassa, Elias. 2010. *Simulation of wheel-rail contact and damage in switches & crossings*. CHARMEC/Department of Applied Mechanics, Chalmers University of Technology, Gothenburg, Sweden. Teoksessa: ELSEVIER, Wear. Vol. 271. Issue 1-2. 18 May 2011. P. 472-481. DOI: 10.1016/j.wear.2010.10.014.

Korkeamäki, Samuel. 2011. *Rataan kohdistuva kuormitus liikkuvan kaluston ja radan vuorovaikutuksessa*. Diplomityö. Liikenneviraston tutkimuksia ja selvityksiä 04/2011. ISSN 1798-6664. ISBN 978-952-255-617-2.

Korkeamäki, S. & Nurmikolu, A. 2009. *Raskaat rautatiekuljetukset ulkomailla ja vaunu-kaluston kuljetuskapasiteettilaskelmat*. Tampere, Tampereen Teknillinen yliopisto. Liite 1 Ratahallintokeskuksen julkaisussa A7/2009. 45 s.

Kyowa 2012. *Gages for measuring axial tension of bolts*. [www-sivu] Lainattu 11.12.2012. Saatavilla: http://catalogue.techno-test.com/catalogue_files/pdf/produits/Strain_Gage_Model_12/fiche_produit_en.pdf

Liikennevirasto 2012a. *Rataverkon kunnossapidon kilpailutus*. [www-sivu]. Lainattu 29.10.2012. Saatavilla: http://portal.liikennevirasto.fi/sivu/www/f/urakoitsijat_suunnittelijat/investointien_kilpailutukset/rataverkon_kunnossapidon_kilpailutus

Liikennevirasto 2012b. *Suomen rautatietilasto 2012*. Liikenneviraston tilastoja 5/2011. [Verkojulkaisu] 56s. ISBN 978-952-255-134-4. Saatavilla: http://www2.liikennevirasto.fi/julkaisut/pdf3/lti_2012_04_suomen_rautatietilasto_web.pdf

Liikennevirasto 2010a. *Ratatekniset määräykset ja ohjeet. Osa 2, radan geometria*. Liikenneviraston ohjeita 3/2010. ISSN-L 1798-663X. ISSN 1798-6648

Liikennevirasto 2010b. *Technical specifications for 54E1 and 60E1 railway turnouts*. J No 6143/068/2010.

Laurila, Tomi. 2012. Kurssin S-113.2110 Materiaalitieteen perusteet luentokalvot. *Mekaaniset ominaisuudet II: Materiaalinen murtuminen*. Lainattu 31.7.2012.

Lilja, Risto. 2009. Virtuaali AMK. *Teräsrakenne*. [www-sivu]. Lainattu 15.6.2012. Saatavilla: <http://www.amk.fi/opintojaksot/030501/1132142124407/1133882334271/1134466388246/1136292458779.html>

Lähteenmäki, Matti. 2012. *Opintojakson K-11043 Lujuusoppi 2 luentokalvot. Väsyminen*. Tampereen Ammattikorkeakoulu. [www-sivu] Lainattu 31.7.2012. Saatavilla: http://home.tamk.fi/~mlahteen/arkistot/luj2_pdf/vasy_k.pdf

Matsumoto, A., Sato, Y., Ohno, H., Tomeoka, M., Matsumoto, K., Ogino, T., Tanimoto, M., Oka, Y. & Okano, M. 2005. *Improvement of bogie curving performance by using friction modifier to rail/wheel interface verification by full-scale rolling stand test*, Wear 258 pp. 1201–1208.

Melamies, Markku. 9.11.2011. *Ratakiskot*. Rautatiesuunnittelun erikoisopintojakson luentokalvot.

Niemi, Pekka. 28.3.2010. *Valuatlas, jälkikäsittelytekniikka. Osa K, aineen koestus*. [www-sivu] Lainattu 18.6.2012. Saatavilla: http://www.valuatlas.fi/tietomat/koosteet/jalkikasittely_tao/index.html

Nummelin, Markku. 1994. *Rautatievaiheet, kehitys, rakenne ja kunnossapito*. VR-Pääkonttori, ratayksikko. 1.1.1994.

Nummelin, Markku. 2003. *Railway Turnouts*. Ratahallintokeskus. ISBN 952-445-096-8

Onnettomuustutkintakeskus, 2003. Pendolino-junan suistuminen Karjaalla 25.7.2003. C 8/2003 R. Saatavilla: <http://www.turvallisuustutkinta.fi/Etusivu/Tutkintaselostukset/Raideliikenne/Raideliikenne2003>

Pirkanmaan Liitto, 30.6.2011. *Tampereen läntisen oikoradan esiselvityksen tarkistaminen*. Raportti.

Pollari, Jari. 9.11.2011. *Vaihteet*. Rautatiesuunnittelun erikoisopintojakson luentokalvot.

Pålsson, Björn A., & Nielsen, Jens C.O. 2012. *Wheel-rail interaction and damage in switches and crossings*. Vehicle System Dynamics: International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility [Verkkolehti] Vol. 50. No. 1/2012. P. 43-58. ISSN 1744-5159.

Rakennuslehti 21.06.2010. *Rataverkon kunnossapidosta tehty uusia sopimuksia*. Lainattu 29.10.2012. Saatavilla: <http://www.rakennuslehti.fi/uutiset/projektit/21811.html>.

Ratahallintokeskus 2000. *Ratatekniset määräykset ja ohjeet, osa 4 Vaihteet*. 154/731/00.

Ratahallintokeskus 2002a. *Ratatekniset määräykset ja ohjeet, osa 11, Radan päällysrakenne*. 921/731/02.

Ratahallintokeskus 2002b. *Ratatekniset määräykset ja ohjeet, osa 14, Vaihteiden tarkastus ja kunnossapito*. 904/731/02.

Ratahallintokeskus 31.8.2004. *Ratatekniset määräykset ja ohjeet, osa 13 Radan tarkastus*. Dnro 1953/731/2004.

Ratahallintokeskus 2006. *Technical Specifications for Railway Turnouts*. 2446/731/06

Ratahallintokeskus 2008. *Ratatekniset määräykset ja ohjeet, osa 3, Radan rakenne*. Dnro 1090/041/2008.

Sachs, N. W. 2005. *Understanding the Surface Features of Fatigue Fractures: How They Describe the Failure Cause, and the Failure History*. Journal of Failure Analysis and Prevention. [Verkkolehti] Vol. 5, Issue 2. P. 11-15. DOI: 10.1361/15477020522924. ISSN: 1547-7029 (painettu). ISSN: 1864-1245 (sähköinen).

Salkonen, Riikka. 2008. *Rautatieliikenteen täsmällisyyden mittaaminen*. Ratahallintokeskuksen julkaisuja. A15/2008. [Verkojulkaisu] ISSN 1797-6995. ISBN 978-952-445-252-6.

Schijve, J. 2003. *Fatigue of structures and materials in the 20th century and the state of the art*. International Journal of Fatigue. Vol. 25, Issue 8. August 2003. P. 679-702. DOI: 10.1016/S0142-1123(03)00051-3.

TTY (Tampereen teknillinen yliopisto), Materiaaliopin laitos. 2005. *Kurssin MOL-1210 Materiaalit luentokalvot*. Lainattu 30.7.2012. Saatavilla: http://www.ims.tut.fi/vmv/2005/vmv_4_1.php

Teknikum, 2012. *Tuotteita radan rakennukseen*. [www-sivu]. Lainattu 26.6.2012. Saatavilla: <http://www.teknikum.com/tuotteet/tekniset-polymeerit-tuotteet-ja-/tuotteita-radan-rakennukseen/>

Trafi, 2011. *Määräys: Rautateiden tavanomaisen liikkuvan kaluston melu*. TRAFI/10831/03.04.02.00/2011. Saatavilla: http://www.finlex.fi/data/normit/38278-TRAFI_10831_03.04.02.00_2011.pdf

Viitala, Tuomo. 9.11.2011. *Päällysrakenteen erikoisteemat*. Rautatiesuunnittelun erikoisopintojakson luentokalvot.

VR 2012a. Kotimaanliikenteen aikataulut. Tampere, Lähtevät junat. [www-sivu] Lainattu 18.5.2012. Saatavissa: http://www.vr.fi/attachments/aikataulut/kotimaanliikenne/newfolder_23/5s7Xa44vc/Tampere.pdf

VR 2012b. Tietoja junista. [www-sivu]. Lainattu 4.10.2012. Saatavilla: http://www.vr.fi/fi/index/palvelut/tietoja_junista.html

Wossloh, 2012. Wossloh Fastening Systems. *System KS Rail fastening systems for ribbed plates*. [www-sivu] Lainattu 25.5.2012. Saatavissa: http://www.vosslohfasteningsystems.com/en/produkte_2010/rippenplatten/ks/k

Haastattelut

Ahtiainen, Markku. 28.9.2012. Itä-Suomen rataverkon tekninen isännöitsijä, Pöyry CM. Suullinen tiedonanto.

Hölttä, Pasi. 2012. Vr Track Oy. Sähköpostikeskustelut 20.6.2012 ja 24.9.2012.

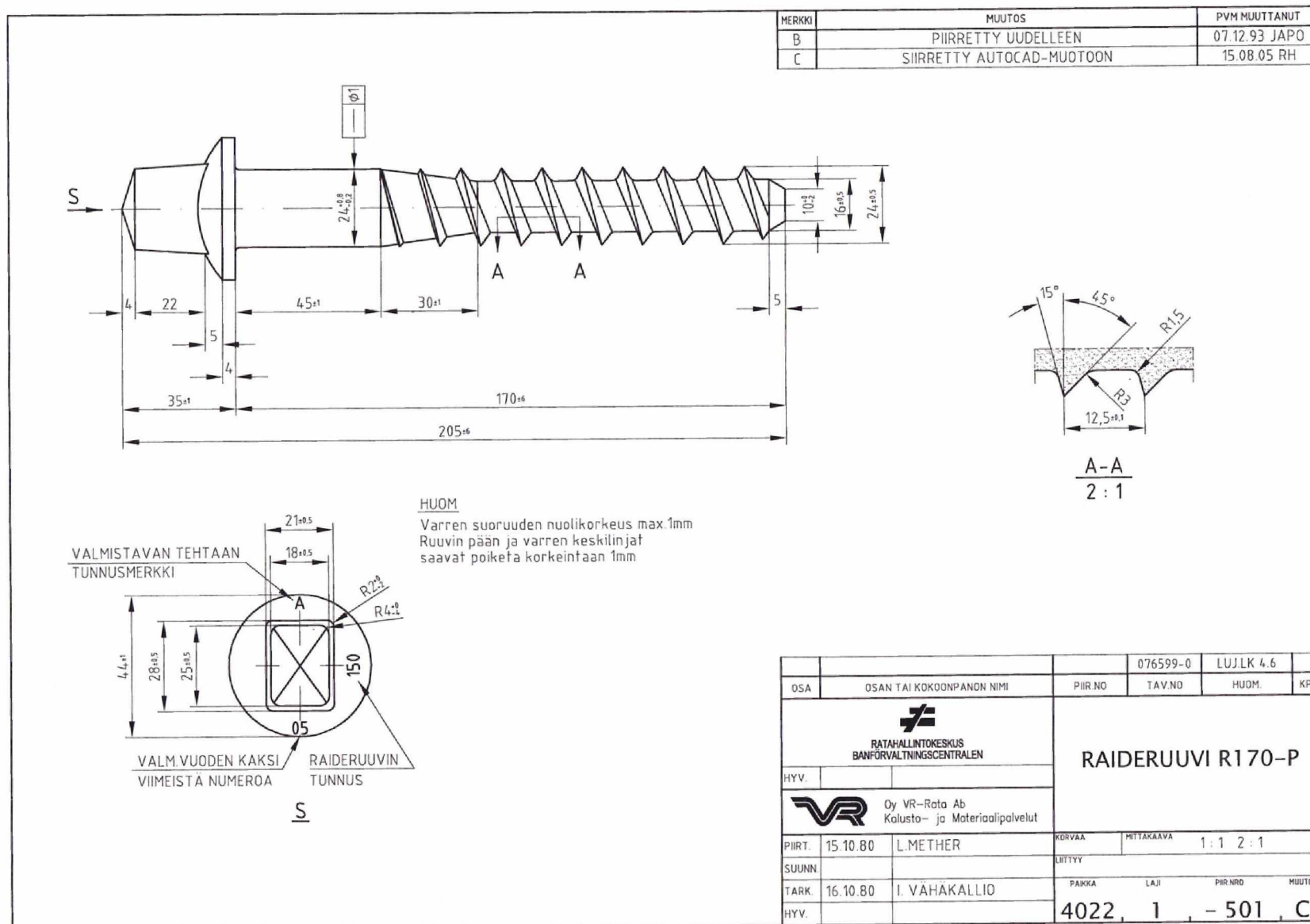
Matikainen, Tomi-Matti. 22.5.2012. Vr Track Oy. Haastattelu.

Nieminen, Risto. 3.12.2012. Testauksen valvoja, Metlab Oy. Sähköpostikeskustelu.

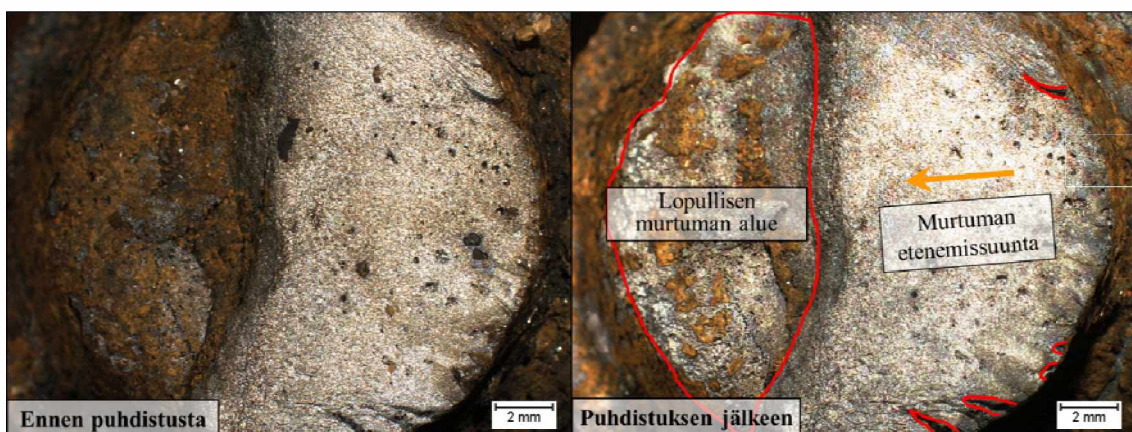
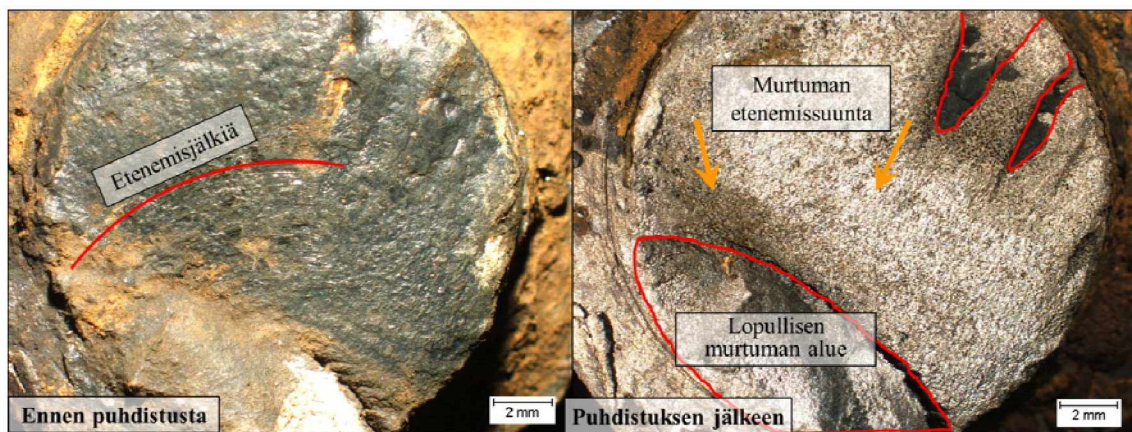
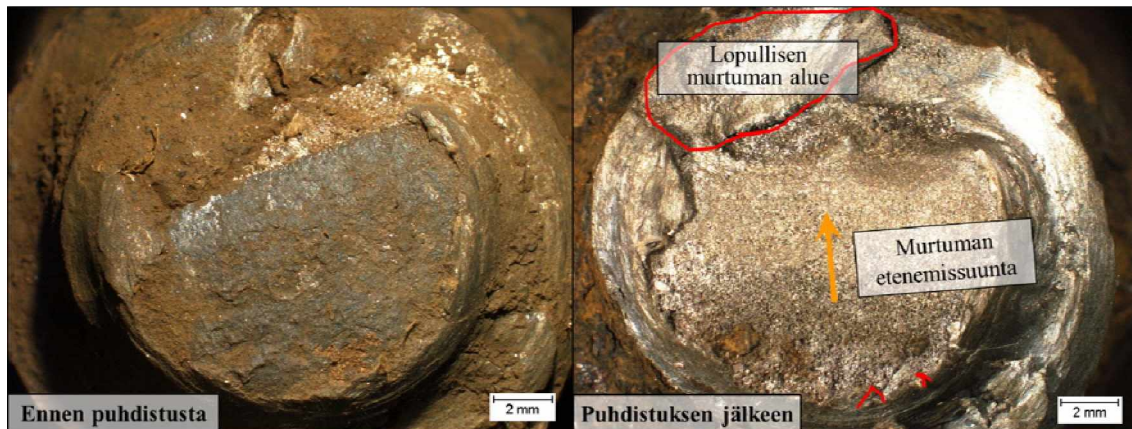
Pullianen, Pertti. 14.11.2012. Pieksämäen vaihdehallin tuotantopäällikkö, Vr Track Oy. Suullinen tiedonanto.

VR Track oy 6.6.2012. Tampereen ratapihan kunnossapitotyöntekijöiden haastattelu.

Raideruuvin tyyppi- ja piirustus




Katkenneiden raideruuvien murtopintoja



Metlab Oy:n testausseleoste raideruuvien vetokokeesta

METLAB OY TESTAUSSELOSTE
METALLURGICAL LABORATORY TEST REPORT
TAMPERE FINLAND
STANDARDI – STANDARD
FINAS
 Finnish Accreditation Service
 T027 (EN ISO/IEC 17025) No. 607/12
 Sivu – Page 1 / 1

SFS – EN 10204 3.2

Tilaaaja – Purchaser :		Inhan Tehtaat Oy Ab Saarikyläntie 21 63700 Ähtäri		Näytteen tulo pvm. – Date of arrival / Tilaaajan tilaus n:o – Purchaser's order n:o 09.02.2012 08.02.2012 / Tarmo Heikkilä	
Tuote – Product :		Valmis koesauva - Ready machined test piece 3 kpl vetokokeita - 3 pcs tensile tests		Materiaalin valmistaja - Material manufacturer -- Todistuksen n:o / pvm. - Certificate n:o / date --	
Raaka-aine – Material : Steel					
Sulatus n:o – Charge n:o : Product: 2002-R170-P ruuvi 1-3					
Mekaaniset ominaisuudet Mechanical properties		VETOKOE – TENSILE TEST ISKUKOE – CHARPY IMPACT TEST KOVUUS – HARDNESS BRINELL ROCKWELL VICKERS		SFS-EN 10002-1 SFS-EN 10045-1 SFS-EN ISO 6506-1 SFS-EN ISO 6508-1 SFS-EN ISO 6507-1	
				M12 / Ø8 x 40 mm	
Koe n:o Test n:o	Pysyvä venymäraja Yield strength ReH [MPa]	Murtolujuus Tensile strength Rm [MPa]	Murtovenymä Elongation A ₅ [%]	Kurouma Reduction of area Z [%]	Iskusitkeys Impact energy Charpy - V [J] °C
					Keskiarvo Average [J]
607.1	307	479	32.0	67	--
607.2	317	477	33.0	65	--
607.3	311	476	32.5	67	--
Vaativukset Requirements		Min. Max.	Yksittäinen arvo - Single value		
Muut kokeet – Other tests : --					
Huomautuksia – Remarks - Purchaser VR-Track Oy				Valvojan allekirjoitus – Supervisor's signature --	
Selosteen osittainen kopioiminen on kielletty ilman METLAB Oy:n lupaa. The report shall not be partially reproduced without the permission of METLAB Oy. Tulokset pätevät vain tutkittuihin näytteille. - The test results relate only to items tested. Mittausepävarmuus – Measurement uncertainty : 95% luotettavuustaso – 95% confidence level, k=2 Kemiallinen analyysi – Chemical analysis : Mittausepävarmuustaulukko toimitetaan pyydettyäessä – Measurement uncertainty table is delivered upon request. ReL, ReH: ±4.2%, Rp0.2: ±4.6%, Rm: ±1.6%, A: ±1.6%, Z: ±2.6% Iskusitkeys – Impact test, energy level : 20J/±2.8J, 50J/±4.3J, >100J ±12.9J Kovuuskokeet – Hardness tests : Brinell HBW: ±2.0%, Rockwell-C: ±2.9%, Vickers HV0.3-HV3 ±4.0%, HV5-HV10 ±2.5%				METLAB OY  Risto Nieminen Testauksen valvoja-Supervisor of testing Testaus ja seloste pvm. Testing and report date 10.02.2012	
Osoite – Address METLAB OY PL 545 33101 (Nuutisranta) 15 33900 Tampere		Puhelin – Telephone +358 - 3 - 31245800 e-mail : metlab@metlab.fi		Telefax +358 - 3 - 31245858 Internet : www.metlab.fi	

Rakennetekniikan koehallin testausseleste raideruuvlin vetokokeesta

Aalto-yliopiston uinsinööritieteiden korkeakoulu Rakennustekniikan laitos Rakennetekniikan koehalli				METALLIEN VETOKOE			Testausseleste nro KH-TS-121116-01		
Asiakas Aalto/DI-työ Koesauvat Suhdesauva M10 /Ø5x25		Tutkija Tekn.yo. Eleonoora Väisänen Sauvan sijainti Ruuvlin vartalon suuntaan, sauvan keskikohta 107 mm ruuvlin kannasta		Materiaali Raideruuvlin lujuus		Koepäivä 16.11.2012 Koeajaja Veli-Antti Hakala			
Vetokone RK250/50 HBM-50 kN		Hienovenymämittalaite MTS 634.11F-24 Kimmokertoimen määrittäsalue 20 N/mm² - 450 N/mm²		Akkumittapituus, Lo 25 mm Mittauspöytätarvikeuus < 0,5 %		Koeplituus, Lc 42,5 mm Standardi SFS-EN 10 002-1 Metallien vetokoe			
Nro	Tunnus	Halkaisija D mm	Pinta-ala mm²	Kimmo- kerroin E N/mm²	Venymä- raja R _{p0,2} N/mm²	Ylempi myötöraja R _{eH} N/mm²	Murto- lujuus R _m N/mm²	Murto- venymä A _{40mm} %	Murto- kurouma Z %
1	Ruuvli 1- 2010-170-F	5,05	20,0296	201242	442	445	622	17,6	46
2									
3									
4									
5									
6									
7									
8									
9									
10									
Keskiarvo		5,05	20,0296	201242	442	445	622	17,6	46,1
Keskihajonta									
Varianssi									
Koestushuomiot									
<p>Espoossa 19. marraskuuta 2012,</p> <p>Koestajan allekirjoitus:</p> <p style="text-align: right;">Koestuksista vastaavan allekirjoitus:</p> <p style="text-align: right;">Veli-Antti Hakala Yli-insinööri</p>									
Käyntiosioite: R-talo Rakentajanaukio 4 02150 Espoo		Postiosioite: Aalto-yliopisto/ENG/R PL 12100 02015 TKK		Puhelin: +358-9-4702 3787, Tutkimushalli I +358-9-4702 3727, Tutkimushalli II +358-9-4702 3789, yli-ins.		Telekopio: Sähköposti: veli-antti.hakala@aalto.fi			

Mittauslaitteiston kuvaus

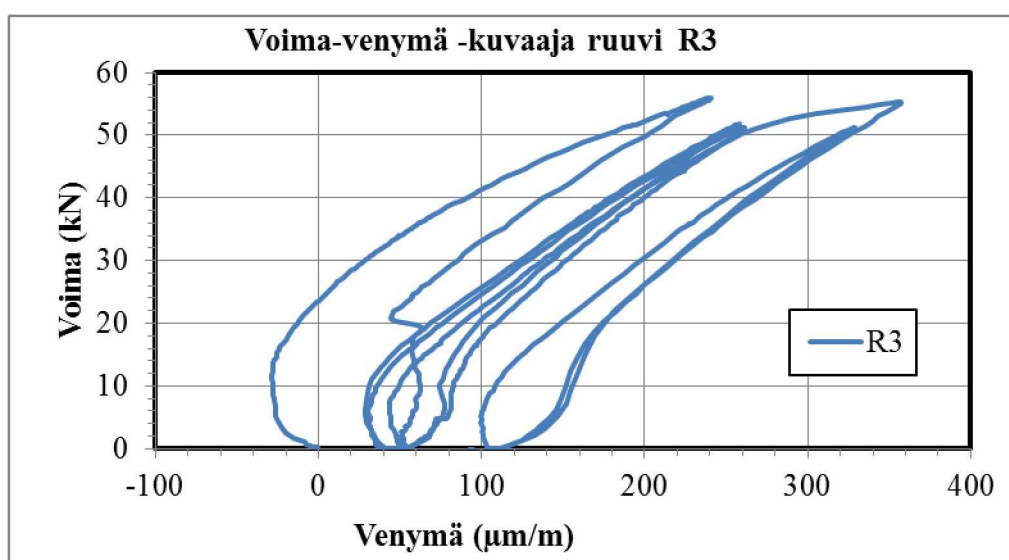
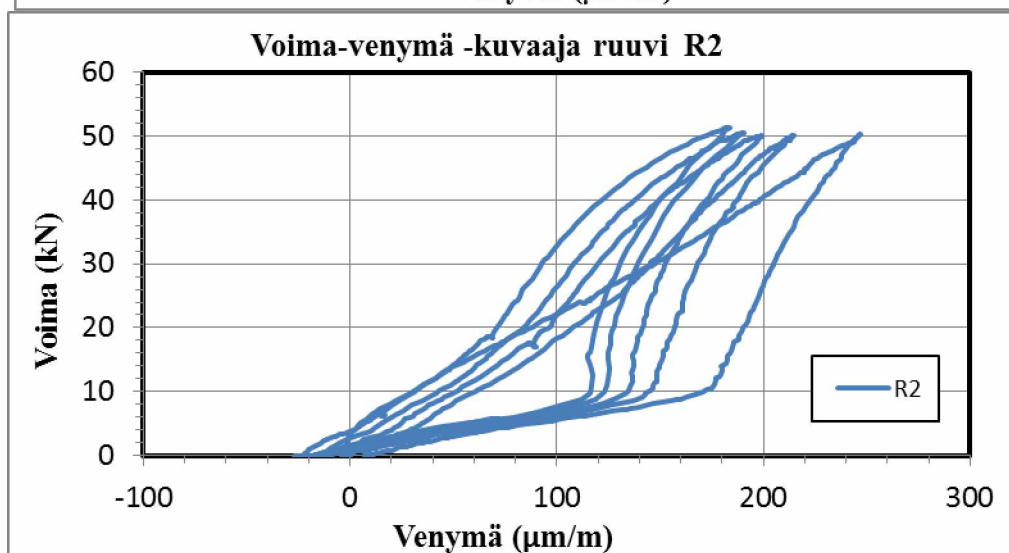
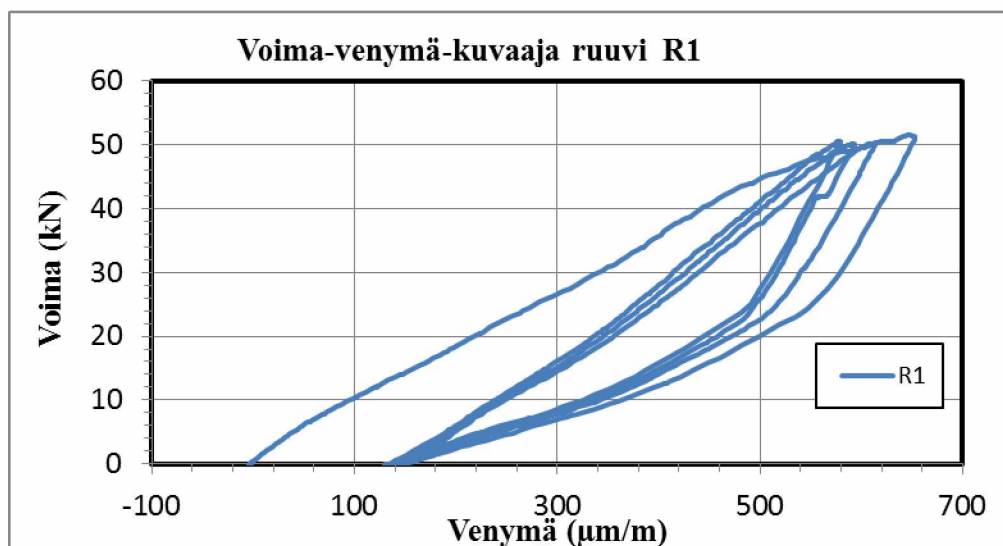
Venymäliuskamittaukset

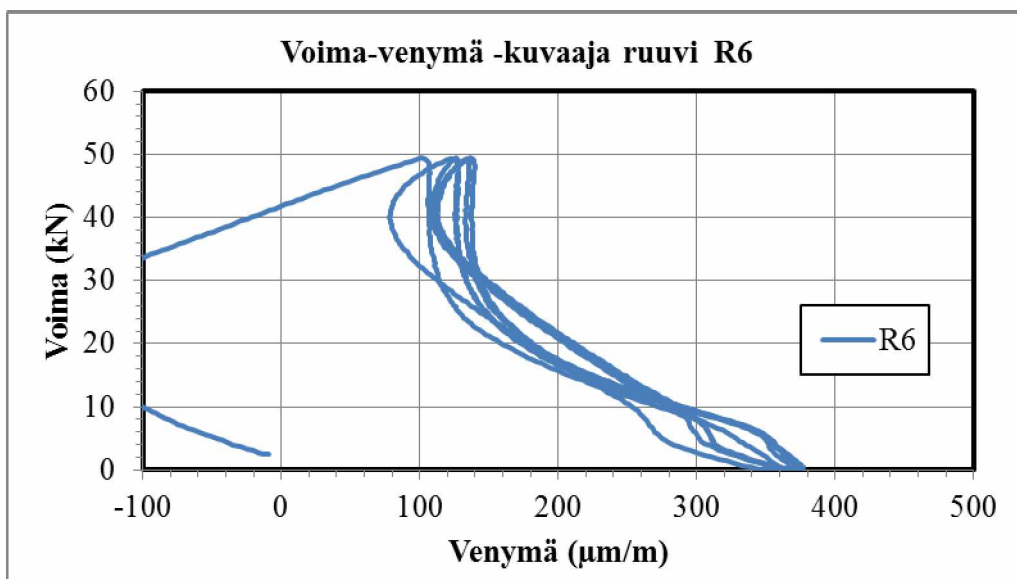
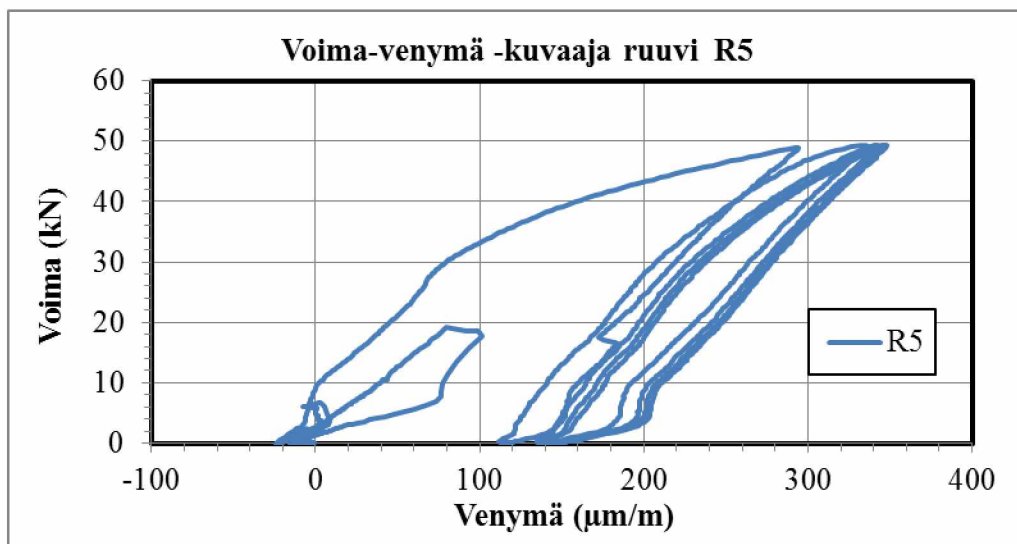
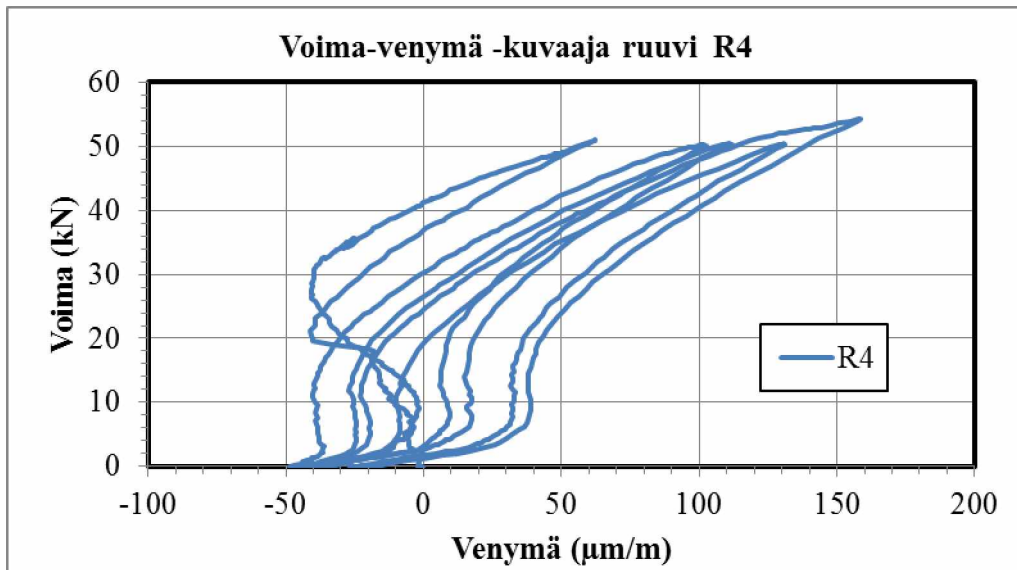
- Mittausmikro
 - Hewlett Packard 6710b
 - Käyttöjärjestelmänä Windows 7
 - Mittausohjelmistona HBM catmanEasy/AP, Version 3.3.3
- Tietoliikenne moduuli/yksikkö
 - Tietokoneen USB-väylään liitettävä tietoliikennemuunnin CANbus-väylää käyttäviä HBM:n laitteita varten
 - Tyyppi CANHEAD®direct
 - Valmistaja Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, Saksa
- Kolme mittausvahvistinta
 - Tyyppi HBM Canhead
 - Valmistaja Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH, Saksa
 - Venymäliuskojen mittamiseen tarkoitettu 10-kanavainen mittausvahvistin, mittaustapana 3-johdin mittaus

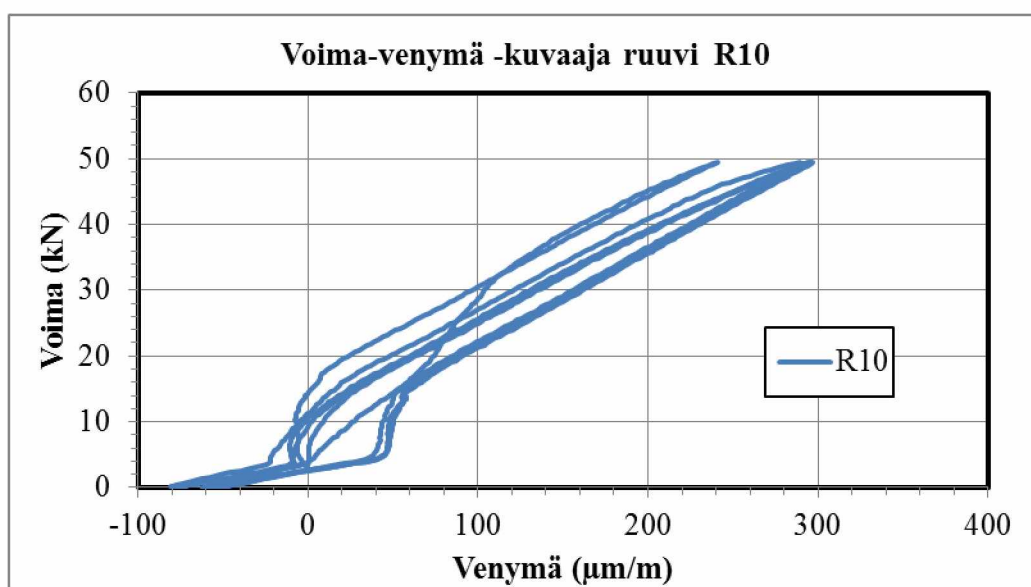
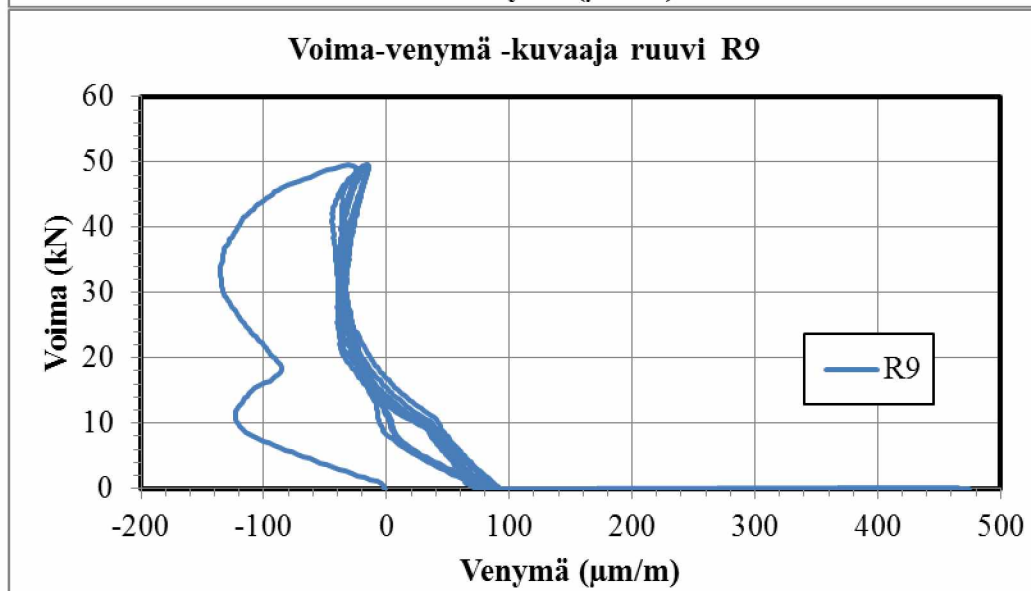
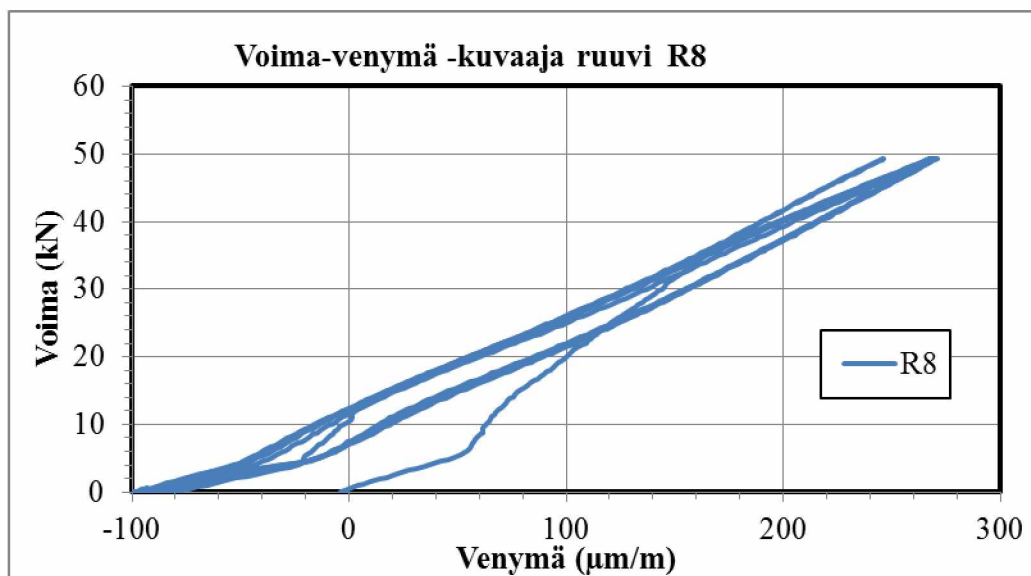
Siirtymämittaukset

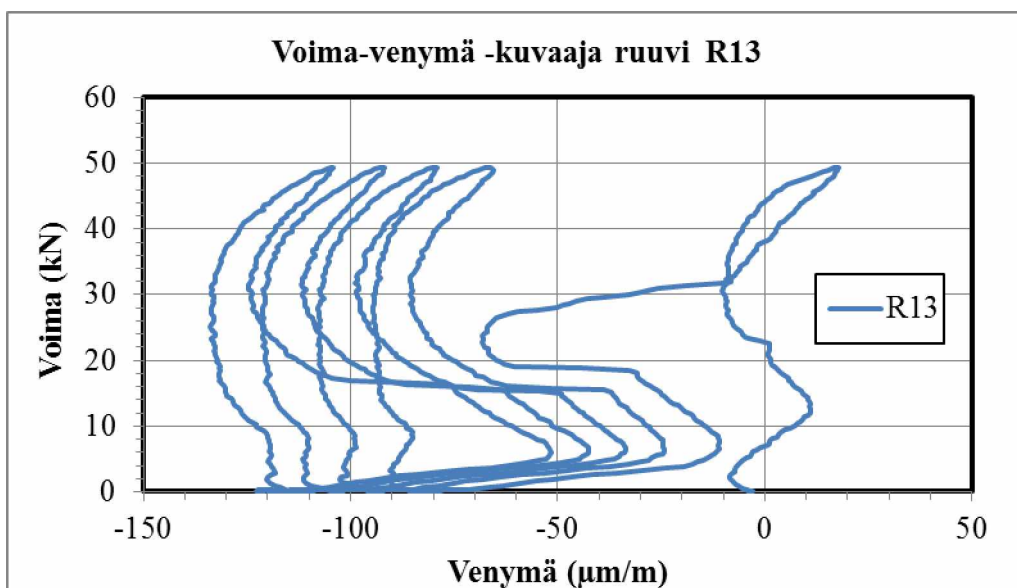
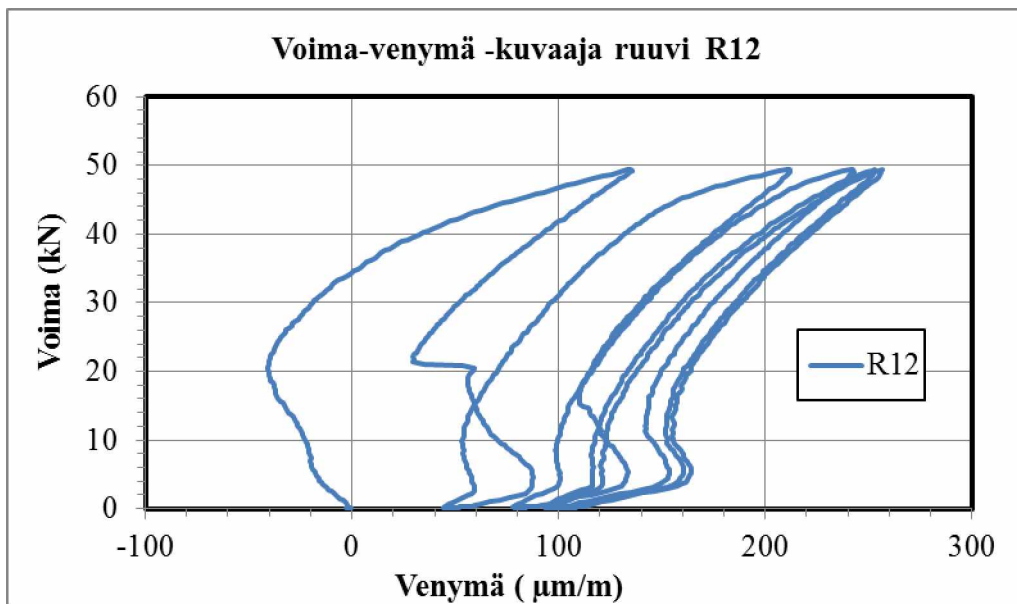
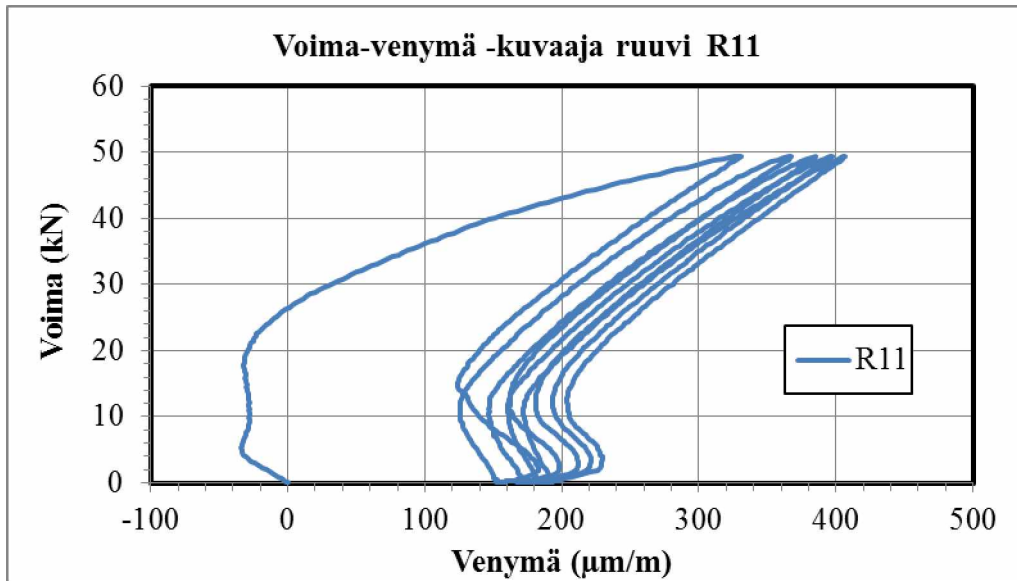
- Mittausmikro
 - Hewlett Packard 6710b
 - Käyttöjärjestelmänä Windows 7
 - Mittausohjelmistona HBM catmanEasy/AP, Version 3.3.
- Mittausvahvistin
 - QuantumX MX840A
 - Verkkoliitännällä varustettu yleiskäyttöön suunniteltu tehokas 24-bittinen 8-kanavainen mittausvahvistin.

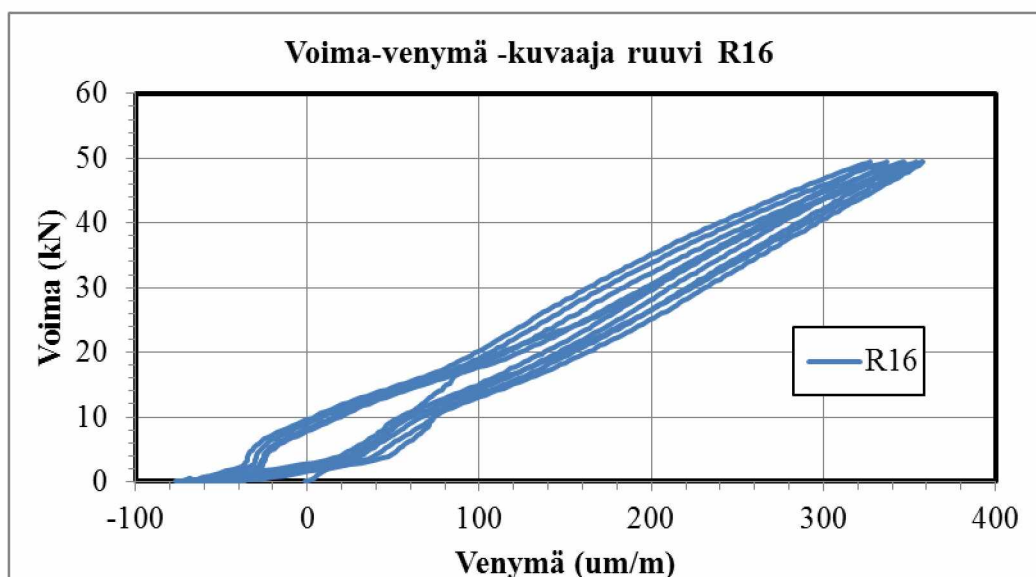
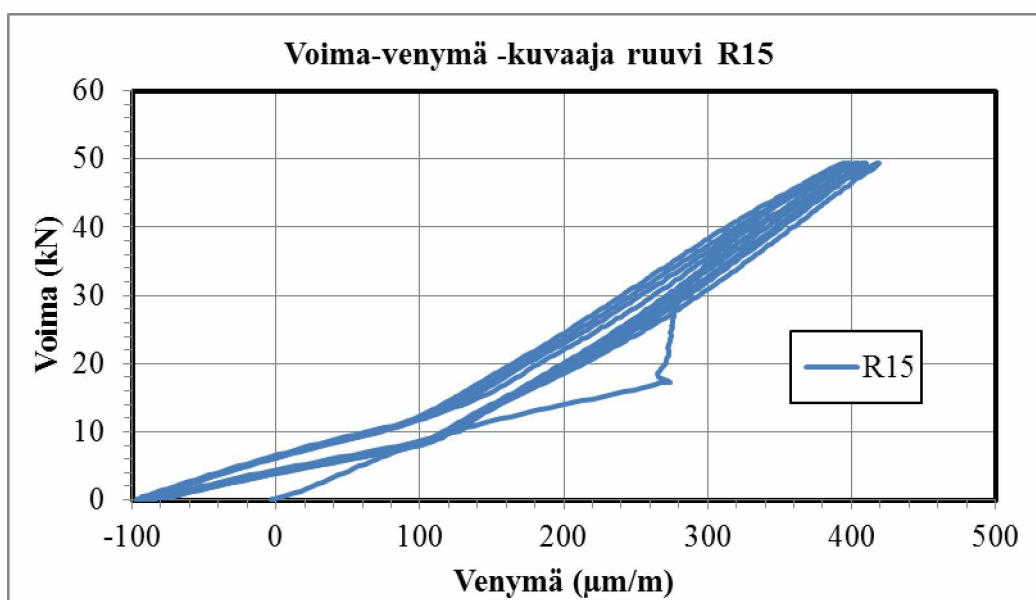
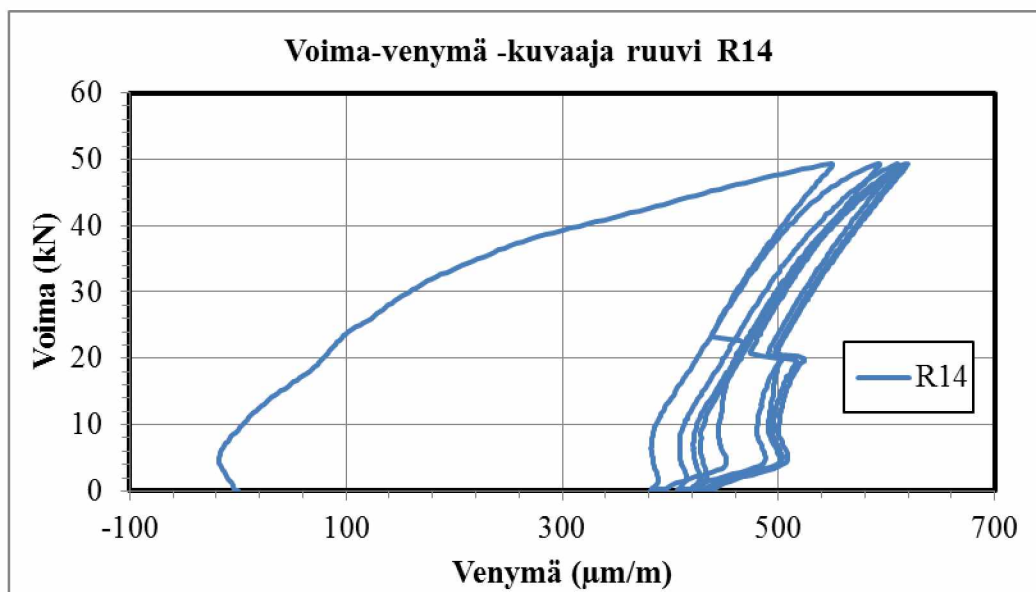
Instrumentoitujen raideruuvien voima-venymä-kuvaajat



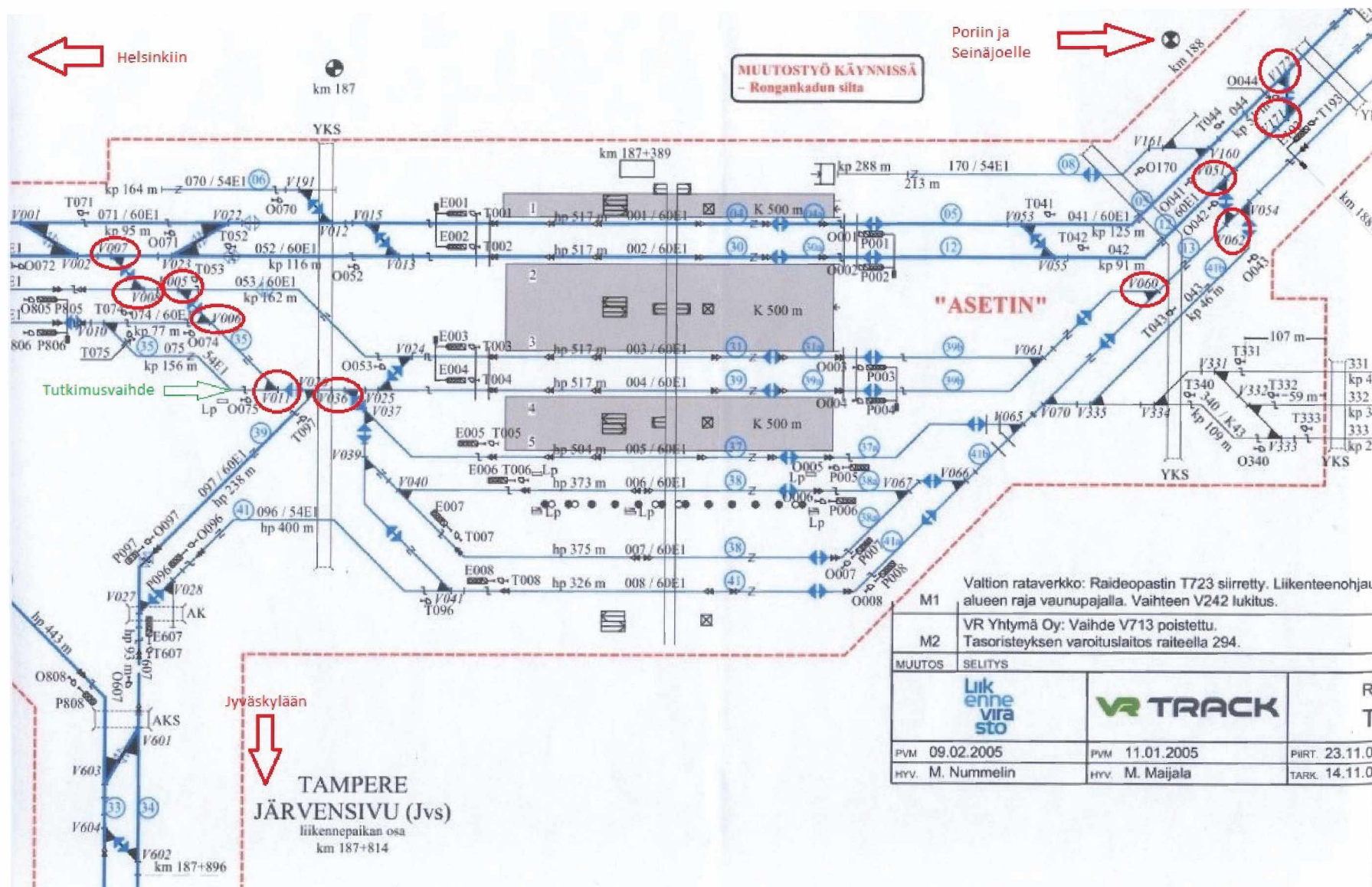








Tampereen ratapihan raiteistokaavio



Koepäiväkirja

Mit. Nro	Pvm.	Aika	Juna	Suunta	Nopeus [km/h]	Datat Venymä	Siirtymä
1	20.8.12	14:25	Kiskobussi, 2 vaunua	myötävaihde	-	EI	ON
2	20.8.12	15:03	SR-1 veturi	myötävaihde	-	ON	ON
3	20.8.12	15:22	InterCity: veturi + 3 x 2-krs.vaunua ja 3 x 1-krs.vaunua	vastavaihde	29 => 35	ON	ON
4	20.8.12	15:43	Taajamajuna (Sm2), 2 vaunua	myötävaihde	32	ON	ON
5	20.8.12	15:55	Pendolino, 6 vaunua	myötävaihde	26	ON	ON
6	20.8.12	16:14	Pikajuna, veturi + 6 vaunua	vastavaihde	28	ON	ON
7	20.8.12	16:17	Tavarajuna, veturi + 15 vaunua	myötävaihde	28	ON	ON
8	20.8.12	16:49	InterCity: veturi + 3 x 1-krs.vaunua + 3 x 2-krs.vaunua	myötävaihde	20	ON	ON
9	20.8.12	16:53	Veturi SR-1	vastavaihde	24	ON	EI
10	20.8.12	17:10	Pendolino, 2 x 6 vaunun yksikköä	myötävaihde	28	ON	ON
11	21.8.12	7:13	Pikajuna, veturi + 4 vaunua	vastavaihde	30	ON	ON
12	21.8.12	7:23	Tavarajuna, ratatyöjuna	myötävaihde	22	ON	ON
13	21.8.12	7:26	Tavarajuna, veturi + 37 vaunua	vastavaihde	35	ON	ON
14	21.8.12	7:41	InterCity, veturi + kolme 2-krs.vaunua	myötävaihde	26	ON	ON
15	21.8.12	7:44	2xveturi + 1x veturi	vastavaihde	20 / 22	ON	ON
16	21.8.12	7:52	Veturi	myötävaihde	28	ON	ON
17	21.8.12	8:11	InterCity: veturi + 3x2-krs.vaunua ja 3x1-krs.vaunua	vastavaihde	32 => 28	ON	ON
18	21.8.12	10:07	SR2-veturi	vastavaihde	30	ON	ON
19	21.8.12	10:12	InterCity: veturi + 3x2-krs.vaunua ja 3x1-krs.vaunua	vastavaihde	29	ON	ON
20	21.8.12	10:44	Pikajuna, veturi + 5 vaunua	myötävaihde	23	ON	ON

Mit. Nro	Pvm.	Aika	Juna	Suunta	Nopeus [km/h]	Datat Venymä	Siirtymä
21	21.8.12	10:50	InterCity, veturi + 3 2-krs.vaunua + veturi perässä	myötävaihde	32	ON	ON
22	21.8.12	11:00	Veturi	myötävaihde	31	ON	ON
23	21.8.12	12:07	SR-2 veturi	myötävaihde	-	ON	ON
24	21.8.12	12:12	InterCity: veturi + 3x2-krs.vaunua ja 3x1-krs.vaunua	vastavaihde	28	ON	ON
25	21.8.12	14:22	Taajamajuna (Sm2), 2 vaunua	myötävaihde	28	ON	ON
26	21.8.12	14:44	SR-1 veturi	vastavaihde	-	ON	ON
27	21.8.12	14:52	SR-1 veturi	myötävaihde	-	ON	ON
28	21.8.12	15:32	InterCity: veturi + 3x2-krs.vaunua ja 3x1-krs.vaunua	vastavaihde	30	ON	ON
29	21.8.12	15:37	Taajamajuna (Sm2), 2 vaunua	vastavaihde	34	ON	ON
30	21.8.12	15:54	Pendolino, 6 vaunua	myötävaihde	27	ON	ON
31	21.8.12	15:56	Taajamajuna, 2 vaunua	myötävaihde	-	ON	ON
32	21.8.12	16:12	Pikajuna, veturi + 5 vaunua	vastavaihde	33	ON	ON
33	21.8.12	16:16	Tavarajuna, veturi + 8 vaunua	myötävaihde	28 - 32	ON	ON
34	21.8.12	16:45	InterCity: veturi + 3x2-krs.vaunua ja 3x1-krs.vaunua	myötävaihde	26 - 31	ON	ON
35	21.8.12	16:55	2xSR1 veturi	myötävaihde	27	ON	ON
36	21.8.12	16:58	Pendolino, 2 x 6 vaunun yksikköä	myötävaihde	28	ON	ON

